Automatisierung eines metrologischen Rasterkraft-mikroskops für großflächige Messungen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut Schmidt Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Christian Recknagel

aus Erfurt

Hamburg 2011

Tag der mündlichen Prüfung: 6. Juli 2011

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. H. Rothe
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Krüger

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Mess- und Informationstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts „Automatisierung der Messabläufe einer Nanometer-Koordinaten-Messmaschine mit rasterkraftmikroskopischer Antastung“.

Mein Dank gilt an erster Stelle dem Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hendrik Rothe. Durch die konstruktiven Gespräche und den Freiraum, den er mir gewährte, trug er maßgeblich zum Gelingen der Arbeit bei. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger danke ich für die Übernahme des Korreferats als auch für seine zahlreichen Hinweise und Denkanstöße.

Für die gute Zusammenarbeit im Rahmen des DFG-Projekts danke ich Robert Annewandter, Dr.-Ing. Martin Gruhlke, Dr.-Ing. Cornelius Hahlweg und Steffen Köhler. Spezieller Dank gilt den technischen Mitarbeitern des Lehrstuhls. Wolfgang Kletz und Wolfgang Schmidt unterstützten mich im Rahmen der mechanischen Werkstatt durch die Fertigung meiner Entwürfe. Dietrich Friemel unterstützte mich mit den Mitteln des Elektroniklabors bei der Lösung von Problemen elektrotechnischer Natur. Für eine stets einsatzbereite IT-Infrastruktur sorgten Reiner Muchow und Lothar Butsch.

Mein Dank gilt allen meinen Kollegen und Kolleginnen für die gute Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Mein herzlicher Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die mich während der Erstellung dieser Arbeit moralisch unterstützt haben.

Christian Recknagel

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Stand der Wissenschaft und Technik **4**

2.1 Allgemeine Messaufgaben 4

2.2 Messprinzip, Betriebsarten, Messdynamik und Regelung 13

2.3 Metrologische Rasterkraftmikroskope 20

2.4 Koordinatenmessgeräte und takile Mikrotaster in der Nanometrologie 25

2.5 Einordnung der Nanometer-Koordinaten-Messmaschine 29

2.6 Mess- und Auswertestrategien in der Nanometrologie 30

2.7 Methoden der digitalen Bildverarbeitung 33

2.7.1 Segmentierung 33

2.7.2 Bildregistrierung 34

3 Regelungstechnische Charakterisierung des Rasterkraftmikroskops **39**

3.1 Gerätespezifische Artefakte 40

3.2 Parameteridentifikation 41

3.3 Optimierung der Regelung 46

3.4 Ansätze zur weiteren Optimierung der Messdynamik 48

4 Automatisierte Messungen mit Vorwissen **53**

4.1 Generierung von Vorwissen 53

4.2 Nutzung der Dimensional Markup Language als Transfer- und Endformat 54

4.3 Konstruktion eines Mehrsensorsystems 56

4.4 Automatische Z-Annäherung durch Autofokus 58

4.5 Auffinden von Regions of Interest mit Hilfe von Markern 58

4.6 Auffinden von Regions of Interest ohne Marker 70

4.7 Methoden zur Optimierung des Laufzeitverhaltens 73

4.8 Vorwissensbasierte AFM-Messungen 77

4.9 Visualisierung von Messdaten 81

5 Automatische Kalibrierung der Nanometer-Koordinaten-Messmaschine **84**

5.1 Kalibrierung der Spitzengeometrie 85

5.2 Kalibrierung der Nanometer-Koordinaten-Messmaschine nach VDI 2656 86

6 Spezifische Messstrategien und Probleme der Nanometrologie 101

6.1 Kantenkriterien für die rastersondenbasierte Nanometrologie 101

6.2 Effiziente Messung von Messprimitiven und großflächigen Messarealen 105

6.3 Gütekriterien zur Detektion von Ausreißern 107

6.4 Fallbeispiel: Messungen von Poren einer Nanofiltrationsmembran 112

7 Zusammenfassung und Ausblick 119

Literaturverzeichnis 124

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung
A	Querschnittsfläche eines Cantilevers.
A	Parameter der Gewichtsfunktion W_1 (H_∞-Regelung).
A_{white}	Parameter zur Beschreibung der Amplitude des Hintergrundrauschens (Sader-Methode).
a	Kontaktradius.
B	Parameter der Funktion $P(\omega)$ (Sader-Methode).
B	Parameter der Gewichtsfunktion W_2 (H_∞-Regelung).
b	Breite eines Cantilevers.
$\|C\|$	Länge der Kontur C.
$C(x,y)$	Korrelationskoeffizient (normalisierte Kreuzkorrelation).
c_1	Mittelwert der Intensitäten der außerhalb der Kontur C liegenden Regionen.
c_2	Mittelwert der Intensitäten der innerhalb der Kontur C liegenden Regionen.
D	Dämpfung (PT_2-Glied).
D_0	typischer Atomabstand.
D_E	Euklidische Distanztransformation.
$D_{xx,yy,xy}$	Filterantworten der Box-Filter (Bildregistrierung/SURF).
E	Elastizitätsmodul.
E	Fehler des Transformationsmodells T (Bildregistrierung).
E_{red}	reduziertes Elastizitätsmodul.
e	Regelabweichung (Regelungstechnik).
F	Auflagekraft.
F_{ad}	Adhäsionskraft.
f_0	Resonanzfrequenz eines Cantilevers.

Symbol	Bezeichnung
f_i	Gewichtsfaktoren.
$G\,(s)$	Übertragungsfunktion der Regelstrecke.
H	Matrix der zweiten Momente (Bildregistrierung).
$H\,(\mathbf{x},\sigma)$	Hesse-Matrix im Bildpunkt $\mathbf{x} = (x,y)$ und auf einer Skala σ.
$h\,(l)$	Werte des Höhenprofils.
h_{max}	Maximaler Höhenwert des Höhenprofils.
h'_{max}	Maximaler Anstieg des Höhenprofils.
$\bar{h}_E$	Schwellwert.
$I\,(x,y)$	Bild.
$I_{\sum}\,(x,y)$	Integralbild.
$I_{xx,yy,xy}\,(\mathbf{x},\sigma)$	partielle Ableitungen des Bildes $I\,(x,y)$ im Bildpunkt $\mathbf{x} = (x,y)$ und auf einer Skala σ.
I_z	Flächenträgheitsmoment.
K	Verstärkungsfaktor (PT_2-Glied).
$K\,(s)$	Übertragungsfunktion des Reglers.
KS	Führungsübertragungsfunktion.
k_B	Boltzmann-Konstante: $1{,}3806504 \cdot 10^{-}23\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}$.
k_c	Federkonstante eines Cantilevers (Approximation als Biegefeder).
L	Länge eines Cantilevers.
L	Antwort des BLoG-Filters (Bildregistrierung).
L_x, L_y	partielle Ableitungen der Antwort des BLoG-Filters L (Bildregistrierung).
l	Längenkoordinate des Höhenprofils.
l_0	Beginn der Messlinie.
l_1	Beginn der Transition zwischen oberen und unteren Höhenniveau.
l_2	Ende der Transition zwischen oberen und unteren Höhenniveau.
l_3	Ende der Messlinie.
M	Referenzmuster.
M	Parameter der Gewichtsfunktion W_1 (H_∞-Regelung).
m_c	konzentrierte Masse eines Cantilevers (Approximation als Biegefeder).
m^*	korrigierte Masse eines Cantilevers (Approximation als Biegefeder).
m_t	Masse der Cantileverspitze (Approximation als Biegefeder).

Symbol	Bezeichnung
p	Die angestrebte Wahrscheinlichkeit mit welcher auf Basis der zufällige gezogenen Datenpunkte ein gutes Modell erzeugt wird (RANSAC).
$P(\omega)$	Funktion zur Approximation der Lage der ersten Resonanzfrequenz eines Cantilevers (Sader-Methode).
$P(s)$	generalisiertes Modell der Regelstrecke.
Q	Gütefaktor eines Cantilevers.
Q_A	Gütekriterium zur Einschätzung der Flankensteilheit.
Q_E	Gütekriterium zur Einschätzung der Einzigartigkeit des Schwellwertes.
Q_F	Gütekriterium zur Einschätzung der Kantenform.
Q_K	globales Gütekriterium.
Q_R	Gütekriterium zur Einschätzung des Signal-Rausch-Verhältnisses.
Q_U	Gütekriterium zur Einschätzung der Überschwingweite.
R	Spitzenradius.
r	Abstand der Atome.
Re	Reynoldszahl.
r	Längenkoordinate (Polarkoordinaten).
S	Störübertragungsfunktion.
s	minimale Anzahl von Datenpunkten zur Erzeugung eines Transformationsmodells (RANSAC).
s_I	empirische Standardabweichung.
T	Temperatur.
T	Zeitkonstante (PT_2-Glied).
$T(x,y)$	Muster (normalisierte Kreuzkorrelation).
$T(\theta,t_x,t_y;x)$	Transformationsmodell (Bildregistrierung).
t	Zeit.
t_x	Translationsparameter des Transformationsmodells T in x-Richtung.
t_y	Translationsparameter des Transformationsmodells T in y-Richtung.
u	Verschiebung in x - Richtung (normalisierte Kreuzkorrelation).
u	Stellsignal (H_∞-Regelung).
u	Stellgröße (Regelungstechnik).
$u(x,y)$	Approximation des zu segmentierenden Bildes I.
v	Verschiebung in y - Richtung (normalisierte Kreuzkorrelation).
v	Regelgröße (H_∞-Regelung).

Symbol	Bezeichnung
$V(r)$	Lennard-Jones-Potential.
W	Adhäsionsarbeit pro Einheitsfläche.
W	Gewichtsfunktion (H_∞-Regelung).
w	exogene Eingänge (H_∞-Regelung).
w	Führungsgröße (Regelungstechnik).
$w(x,t)$	Auslenkung eines Cantilevers.
x	Längenkoordinate eines Cantilevers.
x	Bildkoordinate.
y	Bildkoordinate.
y	Regelgröße (Regelungstechnik).
ZR	dynamisches Z-Rauschen (Gütekriterium).
$Z_c(t)$	Auslenkung eines Cantilevers (Approximation als Biegefeder).
z	exogene Ausgänge (H_∞-Regelung).

Griechische Symbole

Symbol	Bezeichnung
α	Öffnungswinkel der Cantileverspitze.
α_i	Parameter zur Beschreibung der Eigenmoden eines Cantilevers.
β	optimaler Anteil des Überschwingens an der Stufenhöhe.
Δ	Verschiebung zwischen h(l) und M.
δ	Eindringtiefe.
δ	Dirac-Impuls.
ϵ	Tiefe des Potentialminimums des Lennard-Jones-Potentials.
ϵ	Ausreißeranteil des Datensatzes (RANSAC).
η	Viskosität.
Γ	Schwellwertfunktion.
γ_D	Dämpfungskonstante eines Cantilevers (Approximation als Biegefeder).
Γ_i	imaginärer Teil der hydrodynamischen Funktion.

Symbol	Bezeichnung
λ	Maugis Parameter.
λ_1	Parameter.
λ_2	Parameter.
μ	Parameter.
μ_I	Mittelwert des Suchbildes $I\,(x,y)$ (normalisierte Kreuzkorrelation).
μ_T	Mittelwert des Musters $T\,(x,y)$ (normalisierte Kreuzkorrelation).
ν	Parameter.
ω	Kreisfrequenz.
ω_0	Eigenkreisfrequenz eines Cantilevers.
ω_B	Parameter der Gewichtsfunktion W_1 (H_∞-Regelung).
ω_n	Eigenkreisfrequenzen eines Cantilevers.
ω_x	Koordinate der Ortskreisfrequenzen in x-Richtung.
ω_y	Koordinate der Ortskreisfrequenzen in y-Richtung.
ϕ	Längenkoordinate (Polarkoordinaten).
$\phi_n(x)$	Eigenformen eines Cantilevers.
Ψ	Kreuzkorrelation zwischen h(l) und M.
ρ	Dichte.
ρ_f	Dichte des den Cantilever umgebenden Mediums.
σ	Skalen-Parameter (Bildregistrierung).
σ	Position des Potentialminimums des Lennard-Jones-Potentials.
θ	Rotationsparameter des Transformationsmodells T (Bildregistrierung).

Kapitel 1

Einleitung

In den letzten Jahrzehnten hat die Mikroelektronik in beispielloser Weise die Lebens- und Arbeitswelt beeinflusst. Es wurde im Bezug auf die rasante Entwicklung der Rechner- und Telekommunikationstechnik von einem Siliziumzeitalter und einer dritten industriellen Revolution gesprochen. Mit dem Mooreschen Gesetz formuliert Gordon Moore 1965 die These, dass sich die Komplexität integrierter Schaltkreise alle zwei Jahre verdoppelt. Diese Aussage wurde sehr schnell zum Paradigma einer fortschreitenden Miniaturisierung innerhalb der Mikroelektronikindustrie. Mittlerweile stößt allerdings eine weitere Miniaturisierung zunehmend an physikalische Grenzen. Neben der Mikroelektronik hat sich basierend auf der Technologie der Mikroelektronik, die Mikrosystemtechnik entwickelt. Mit der Mikrosystemtechnik können mikroelektronische, mikromechanische, mikrofluidische und mikrooptische Baugruppen zu einem Gesamtsystem, einem MEMS (engl. micro electro mechanic systems) verschmelzen. Der Begriff „Nanotechnologie“ wurde zuerst von *Taniguchi* im Rahmen der Bearbeitung von Material mit Nanometer-Präzision durch Ultrafeinbearbeitung verwendet [CMPW00]. In seinem wegweisenden Vortrag „There is plenty room at the bottom“ beschrieb der Physiker Richard Feynman 1959 eine weitere Stufe der Beherrschung von Materie und Energie, die direkte Manipulation von Atomen und Molekülen. Im Rahmen der Forschung und der kommerziellen Anwendung hat sich der Begriff „Nanotechnologie“ etabliert. Als Nanotechnologie wird heute die Forschung und Entwicklung von Strukturen im atomaren, molekularen, meso- und mikroskopischen Bereich bezeichnet, bei denen mindestens eine Dimension kleiner als $100\,\mathrm{nm}$ ist [DDX+09]. Die Nanotechnologie ist keine einfache Skalierung der Mikrotechnologie, sondern stellt eine technologische und gesellschaftliche Singularität dar. Abbildung 1.1 zeigt anschaulich die verschiedenen Trends, welche innerhalb dieser Singularität konvergieren. Der erste Trend zeigt die Entwicklung von einer makroskopischen Materialbearbeitung, basierend auf einem Kontinuumsmodell, zu einer nanoskopischen Materialbearbeitung auf Basis von Atomen und Molekülen. Ein zweiter Trend zeigt die Verschmelzung von Molekularbiologie und Mechanik. Ein dritter Trend zeigt die Entwicklung der Chemie von einfachen Molekülen zu komplexen supramolekularen Bauelementen. Um die Nanotechnologie praktisch zu einer industriellen Nutzung zu führen, benötigt man Messinstrumente und Techniken zur Qualitätssicherung im Mikro- und Nanometerbereich. Benötigt wird eine dimensionelle

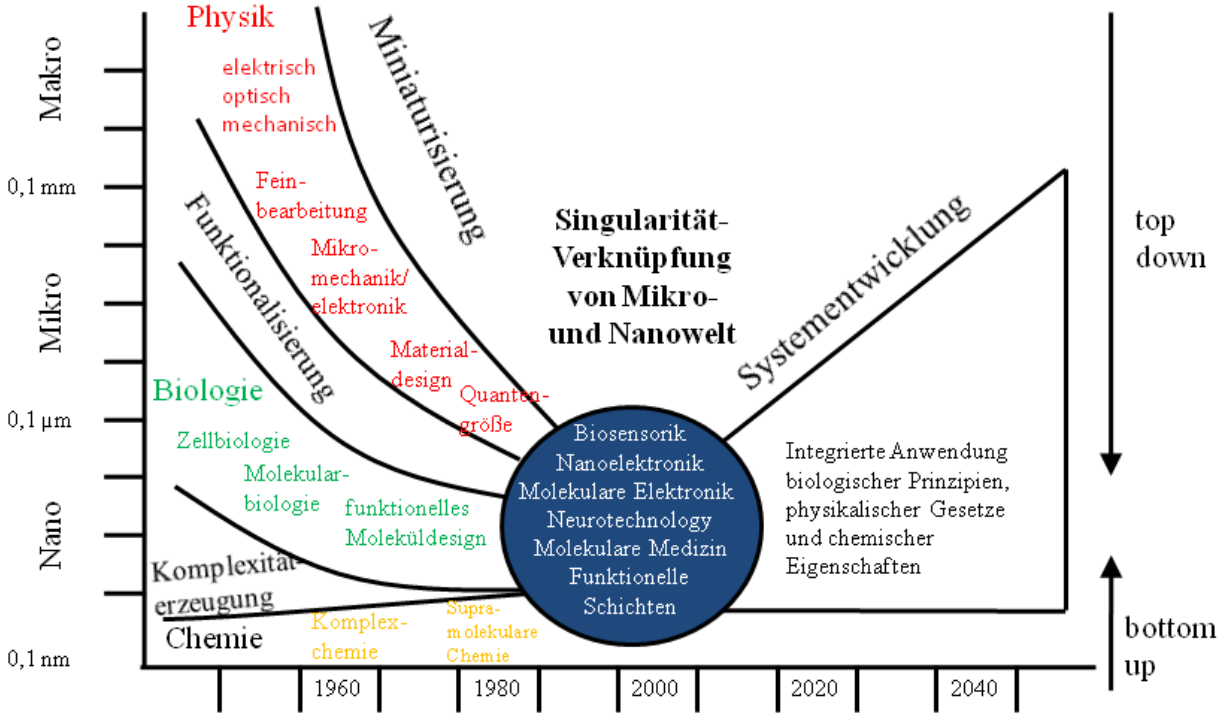


Abbildung 1.1: Nanotechnologie als Singularität (nach [Roh94, DDX+09]).

Nanometrologie. Eine Klasse dieser Messinstrumente nennt sich Rastersondenmikroskope (kurz: SPM von engl.: scanned probe microscope). Das erste Rastersondenmikroskop von *Young et al.* [YWS72] nannte sich „Topografiner“. Der Durchbruch in der Rastersondenmikroskopie gelang erst 1982 durch die Entwicklung des Rastertunnelmikroskops (kurz STM von engl.: scanning tunneling microscope) durch *Binnig und Rohrer* [BRGW83]. Im Jahr 1985 wurde, basierend auf dem Rastersondenprinzip, das Atomkraftmikroskop (kurz: AFM von engl. atomic force microscope) durch *Binnig et al.* [BQG86] entwickelt. Gewissermaßen das Arbeitspferd der dimensionellen Messtechnik im Nanobereich ist das Atomkraftmikroskop beziehungsweise das Rasterkraftmikroskop (SFM von engl.: scanning force microscope). Mit einem Marktanteil von ca. 90 % stellen die Rasterkraftmikroskope den Hauptteil an den Rastersondenmikroskopen [DDX+09]. Die Optimierung der Messeigenschaften von Rasterkraftmikroskopen ist trotz deren 25-jähriger Anwendungsgeschichte ein Gegenstand aktueller Forschung.

Zielsetzung dieser Arbeit ist die regelungstechnische Charakterisierung und Optimierung des vorliegenden Rasterkraftmikroskops. Vorhandene Messartefakte im Kontaktmodus sind zu untersuchen und gegebenenfalls zu minimieren. Grundlegende Messabläufe des Rasterkraftmikskops sind zur Verbesserung der Handhabung zu automatisieren. Hauptfaktoren für die Messunsicherheit des Systems sollen innerhalb einer Kalibrierung eben dieses untersucht werden. Bestehende Probleme bei der Messung von großflächigen, nanostrukturierten Proben sind zu untersuchen und durch neue Messstrategien zu lösen.

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über den Stand der Technik im Bereich der Nanometrologie gegeben. Einleitend werden allgemeine Messaufgaben in der Nanometrologie sowie die Grundlagen der Rasterkraftmikroskopie diskutiert. Des Weiteren wird das vorliegende System in die nationale und internationale Forschungslandschaft eingeordnet. Gegenwärtige Trends zur Weiterentwicklung von Rasterkraftmikroskopen werden erläutert.

In Kapitel 2 wird die regelungstechnische Charakterisierung und Optimierung des vorliegenden Rasterkraftmikroskops behandelt. Eine neue Reglerstruktur auf Basis eines Field Programmable Analog Array (FPAA) wird untersucht. Ansätze zur Weiterentwicklung der Regelung des Rasterkraftmikroskops durch den Einsatz einer H_∞-Regelung werden erarbeitet.

In Kapitel 3 wird ein Konzept zur Automatisierung der Messabläufe des Rasterkraftmikroskops vorgestellt. Es wird eine vollständige Kette von Methoden von der Messplanerstellung mittels Vorwissen über die Orientierung auf großflächigen Proben mittels digitaler Bildverarbeitung bis zur automatischen AFM-Messung entwickelt und implementiert.

In Kapitel 4 werden durch eine Kalibrierung des Systems die Hauptfaktoren der Messunsicherheit identifiziert und quantifiziert. Möglichkeiten der Automatisierung der Kalibrierung auf Basis der in Kapitel 3 erarbeiteten Methoden werden untersucht. Speziell für die Kalibrierung der Z-Achse wird eine neue Methodik entwickelt.

In Kapitel 5 werden spezielle Messstrategien für die Nanometrologie entwickelt. Die Extraktion von Geometrieelementen mittels Kantenkriterien wird untersucht. Innerhalb einer Fallstudie wird die Charakterisierung von Nanofiltrationsmembranen untersucht.

Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. In einem Ausblick werden wichtige Vorschläge für eine Weiterentwicklung des Gerätedesigns gegeben.

Kapitel 2

Stand der Wissenschaft und Technik

Innerhalb einer sich stetig entwickelnden Mikro- und Nanotechnologie ergeben sie vielfältige Aufgaben für die Messtechnik. Im ersten Teil dieses Kapitels wird eine Zusammenfassung über aktuelle und zukünftige Messaufgaben in der Nanometrologie gegeben. Dabei wird insbesondere auf die Anwendung der Rastersondenmikroskopie eingegangen. Des Weiteren erfolgt in Teilbereichen eine Abgrenzung von alternativen Messverfahren wie beispielsweise der Rasterelektronenmikroskopie. Verschiedene Messaufgaben und -objekte werden auf Basis ihrer Form, Struktur und Komplexität kategorisiert. Nach dieser Einführung wird speziell die Funktionsweise von Rasterkraftmikroskopen eingehend erläutert. Der Stand der Technik im Bereich der Nanometrologie wird insbesondere durch die metrologischen Fähigkeiten der nationalen metrologischen Institute (NMI) abgebildet. Nach einer Zusammmenfassung der Referenzgeräte der nationalen metrologischen Institute im Bereich der metrologischen Rasterkraftmikroskope folgt eine Übersicht verfügbarer Koordinatenmessgeräte und taktiler Taster. Ziel ist eine Einordnung der Nanometer-Koordinaten-Messmaschine (NCMM) im nationalen und internationalen Vergleich. Neben dem Stand der Technik in der Geräteentwicklung werden aktuelle Messstrategien der Nanometrologie und für das Verständnis der Arbeit relevante Methoden der digitalen Bildverarbeitung dargelegt.

2.1 Allgemeine Messaufgaben

Allgemeine Messaufgaben in der Mikro- und Nanometrologie sind [HCHDC06, DDX+09]:

- Der Abstand ist definiert zwischen zwei Oberflächen gleicher Orientierung.
- Die Breite bezeichnet den Abstand zwischen zwei gegenüberliegenden Oberflächen.
- Die Höhe ist als Abstand zwischen zwei Oberflächen gleicher Orientierung definiert, aber in vertikaler Richtung platziert.
- Die Geometrie oder die Form sind definiert als Abstand zwischen der Oberfläche eines Objekts und einer vordefinierten Referenz.

- Die Textur und Rauheit sind definiert als Geometrien der Oberflächenstruktur deren Dimensionen klein gegenüber deren Messobjekt sind.
- Das Aspektverhältnis ist definiert als Tiefe einer Struktur geteilt durch deren Breite.
- Schichtdicke
- Partikeldurchmesser

Hansen et al. unterscheidet zwischen 2D-, $2^1/_2$D- und 3D- Messobjekten. Messobjekte mit einem Aspektverhältnis kleiner 1 werden als 2D eingeordnet. Ist das Aspektverhältnis größer oder gleich 1 werden die Messobjekte als $2^1/_2$D bezeichnet. Werden Hinterschneidungen, Freiformen oder Merkmale in Kavitäten gemessen, dann handelt es sich um 3D-Messobjekte [HCHDC06]. Zur Zeit existiert kein Messsystem, welches 3D-Messungen im Nanometerbereich ausführen kann. Die Fähigkeiten von Rasterkraftmikroskopen beschränken sich auf 1D-, 2D- und $2^1/_2$D-Messaufgaben (siehe Abbildung 2.4), welche mit Messunsicherheiten im Nanometerbereich und darunter gemessen werden können. Die Abbildung 2.1 zeigt einen Überblick über verschiedene Messprinzipien der Mikro- und Nanometrologie. Optische Methoden wie z.B. konfokale Mikroskope und Interferenzmikroskope sind in ihrer lateralen Auflösung durch die Beugungsgrenze eingeschränkt. Dennoch sind sie durch ihre sehr gute vertikale Auflösung gut etablierte Messgeräte der Mikro- und Nanometrologie. Insbesondere bei der Detektion und der Messung von Partikeln und Nanopartikeln findet die Streulichtmesstechnik ihre Anwendung. Tastschnittgeräte sind aufgrund von Spitzenradien im Mikrometerbereich in ihrem Auflösungsvermögen stark eingeschränkt. Rasterelektronenmikroskope (SEM von engl.: scanning electron microscopes) und Rastersondenmikroskope (SPM von engl: scanning probe microscope) konkurrieren beziehungsweise ergänzen sich im Bereich der Nanometrologie. Unter den Rastersondenmikroskopen sind die Rasterkraftmikroskope eine Hauptgruppe [DDX+09]. Beide Messprinzipien haben Vor- und Nachteile, die für den konkreten Anwendungsfall abgewogen werden müssen. Ein solches Hauptanwendungsgebiet von Rastersondenmikroskopen ist die **Halbleiterindustrie**. Aufgrund der in der Halbleiterindustrie vorherrschenden schichtweisen Aufbau- und Abtragsverfahren muss die Metrologie In-Line, in der Fertigung, erfolgen. Die Implementierung der Rasterkraftmikroskope in der Halbleiterindustrie erweist sich aufgrund des prinzipbedingt geringen Durchsatzes und der Notwendigkeit von hochqualifizierten Bedienern als schwierig. Ein Vorteil der Rasterkraftmikroskopie (SFM) ist, dass sie im Gegensatz zur Rasterelektronenmikroskopie (SEM) oder der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) keine Probenpräpartion erfordert. Ein Rasterkraftmikroskop kann Messaufgaben erfüllen, die durch andere Messgeräte nicht ausgeführt werden können. Rasterkraftmikroskope dienen in der In-Line-Metrologie als Referenzgeräte für die Kalibrierung der schnelleren und weiter verbreiteten Rasterelektronenmikroskope (SEM). In der Maskenmetrologie sind die Rastersondenmikroskope den Rasterelektronenmikroskopen überlegen. Rasterelektronenmikroskope können zum Aufbau von Oberflächenladungen und elektrostatischen Entladungen, die die Maske beschädigen, führen. Rasterkraftmikroskope können hingegen nicht-zerstörende Materialprüfungen an Masken durchführen [MG01].

Es ergeben sich folgende metrologisch zu ermittelnde Größen [DDX+09]:

- Ebenheit, Welligkeit und Rauheit der Substratoberflächen
- Dicke der Substrate
- Schichtdicke und -profil
- Stufenhöhe
- „Line width“ sowie „Line edge roughness“ als Strukturbreite sowie die Änderung einer Strukturbreite über die Länge einer Struktur
- „Overlay accuracy“ als Genauigkeit der Maskenpositionierung
- „Critical Dimension“ (CD) als kleinste Strukturbreite innerhalb einer integrierten Schaltung

Die Messobjekte der Halbleiterindustrie werden als 2D- oder $2^1/_2$D-Messobjekte eingeordnet. Insbesondere die Wiederholbarkeit und die Prozessstabilität über den gesamten Wafer sind wichtige und kritische Qualitätsparameter in der Halbleiterindustrie. Die Anwendung der Rastersondenmikroskopie zur Produktinspektion ist wahrscheinlich bei den Herstellern von **Datenspeichern** am weitesten fortgeschritten. Diese Geräte können Oberflächenmerkmale im Submikrometerbereich lesen und schreiben. In den beiden Hauptgruppen von Datenspeichern, den optischen und den magnetischen, finden die Rastersondenmikroskope besonders im Bereich der magnetischen Datenspeicher, den Festplatten, breite Anwendung. Die Festplatten-Leseköpfe schweben mit einem Abstand von wenigen Nanometern auf einem Luftpolster über den magnetischen Datenträger. Dabei erweisen sich die Abmaße der funktionellen Teile des Schreib-/Lesekopfes sowie die Rauheit des Lesekopfes und die des magnetischen Mediums als kritisch für die Funktion des Datenträgers. Während des Start- und Abschaltvorgangs von Festplatten schweben die Schreib-/Leseköpfe nicht auf einem Luftploster, sondern haben direkten Reibkontakt. Im diesem Landebereich werden laser-erzeugte Löcher zur Minimierung der Kontaktfläche aufgebracht. Diese Löcher werden mit Rasterkraftmikroskopen charakterisiert. Im Bereich der optischen Medien werden die Datenträger durch Stempelvorgänge repliziert. Dabei dienen die Rasterkraftmikroskope zur Qualitätssicherung der Medien sowie der Abformwerkzeuge [VDWI97]. Auf Basis der Fertigungstechnologie der Halbleiterindustrie hat sich die **Mikrosystemtechnik** entwickelt. Mittlerweile hat sich dieser Forschungs- und Anwendungsbereich in viele untergeordnete Gebiete aufgeteilt. Einen Einblick in die Dimensionalität und Komplexität gängiger Messaufgaben im Bereich der Mikrosystemtechnik bietet Abbildung 2.2. Im Bereich der Mikrosysteme kann zwischen Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Mikrofluidik, Mikrooptik und Mikrowerkzeugen unterschieden werden.

„Traditionelle“ **MEMS** basieren auf der Fertigungsplattform der Halbleiterindustrie. Normalerweise sind sie durch ein höheres Aspektverhältnis als integrierte Schaltungen charakterisiert. Durch die relativ kleinen absoluten Dimensionen und hohe Aspektverhältnisse stellen sie eine metrologische Herausforderung dar. Des Weiteren erweist sich die Anwesenheit mechanischer und

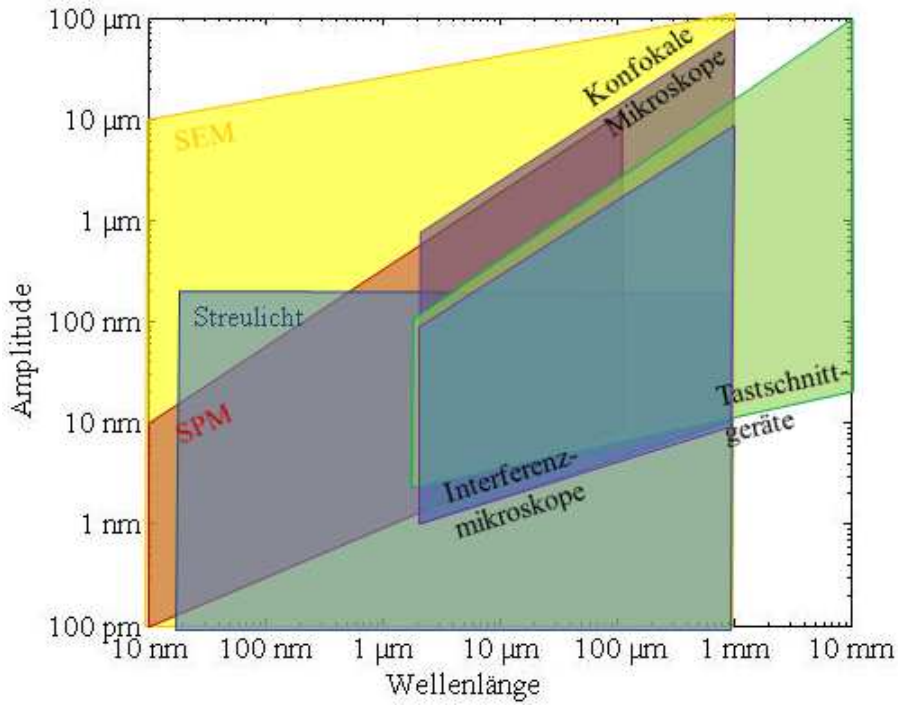


Abbildung 2.1: Einordnung der Rastersondenmikroskopie auf Basis des Messbereiches in lateraler (Wellenlänge) und vertikaler (Amplitude) Richtung (nach [DCKPL03]).

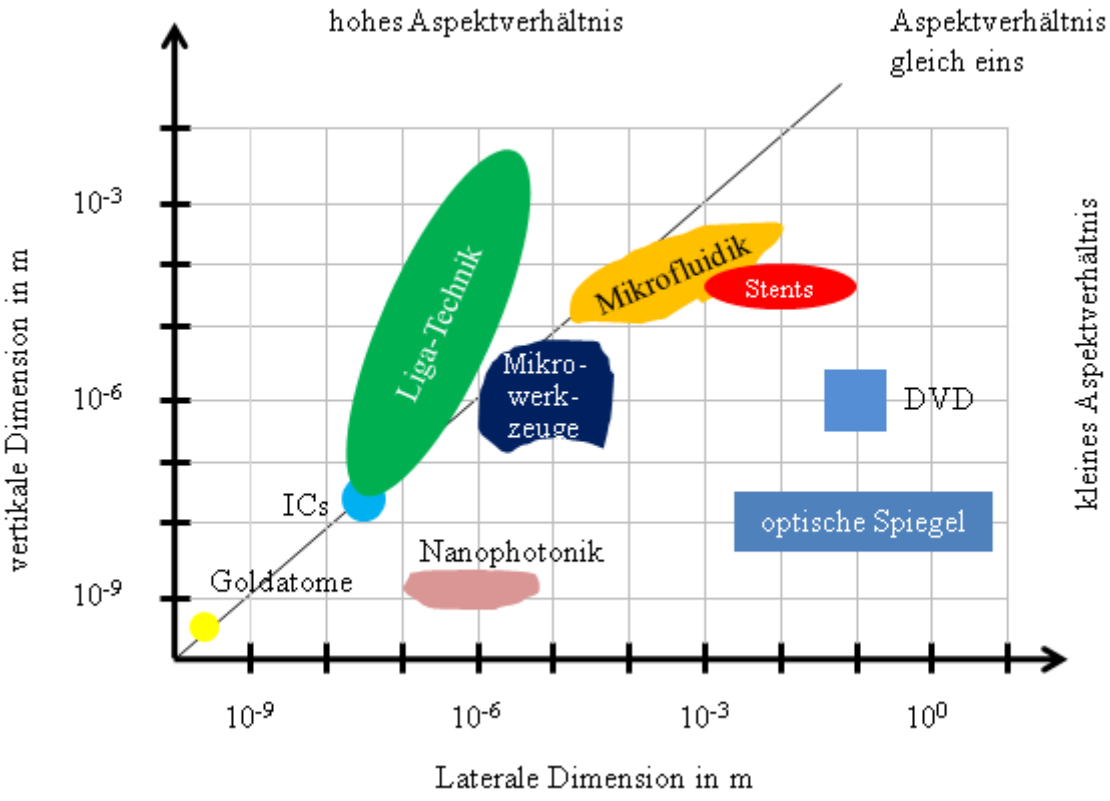


Abbildung 2.2: Größenordnung und Aspektverhältnisse gängiger Mikrosysteme (nach [HCHDC06]).

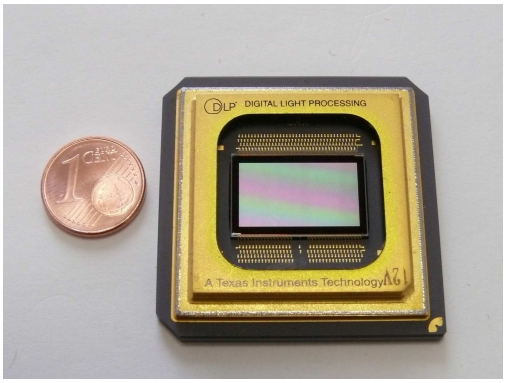


Abbildung 2.3: Mikrospiegelarray.

beweglicher Teile, welche sensibel gegenüber mechanischen Deformationen sind, als erschwerend. Typische Messgrößen sind Dimension, Stufenhöhe und Oberflächentextur. Die Geometrien sind im Wesentlichen $2^1/_2$-dimensional, möglicherweise mit freistehenden Biegebalken, Löchern und Einschlüssen [HCHDC06]. Ein Beispiel für eine Anwendung in einem Produkt der Alltagswelt ist die Qualitätssicherung von Mikrospiegelarrays (engl. Digital Mirror Device / DMD). Diese Mikrospiegelarrays dienen zur Bilderzeugung in Beamern und Videoprojektoren. Auf einem Chip (siehe Abbildung 2.3) befinden sich 0.5 bis 1.2 Millionen einzeln angesteuerte Spiegel. Die Lebensdaueranforderung beträgt 450 Milliarden Bewegungszyklen. Die CMOS-Elektronik ist vollständig in das MEMS integriert. Beispielspezifische Messaufgaben sind die Messung der Spiegelebenheit, der Spiegeloberflächenrauheit und des Spiegelabstandes[SNH+02].

Ein weiterer Zweig der Mikrosystemtechnik ist die **Mikrofluidik**. Besonders in der Chemie, Biochemie und der Medizin entwickelten sich in der letzten Dekade sogenannte „lab-on-a-chip“- Systeme. Verwendete Konstruktionswerkstoffe sind Silizium und Polymere. Es zeichnet sich ein Trend in Richtung polymerbasierter Produkte ab. Herstellungstechnologien sind Mikrospritzgießen und Heißprägen. Die Metrologie setzt hier vor allem bei der Qualitätssicherung der Fertigungswerkzeuge an. Deren Herstellungstechnologie basiert auf Kombinationen aus Photolithographie, Ätzen und Galvanisierung sowie thermischen und mechanischen Methoden des Materialabtrags. Durch den Einsatz von Methoden der Präzisionsbearbeitung können neben aus der Halbleiterindustrie bekannten $2^1/_2$D-Strukturen ebenfalls 3D-Strukturen erzeugt werden [HCHDC06]. Neben der Tiefe und Breite von Mikrokanälen spielt auch die Form der Seitenwände in der Mikrofluidik eine große Rolle. Ebenso ist die Rauheit der Kanäle wichtig für den Transport von Flüssigkeiten [Fri05a].

Die absolute Dimension von Strukturen im Bereich der **Mikrooptik** bewegt sich im Bereich von einigen 10 bis einigen 100 μm. Bei mikrooptischen Strukturen ist als Messgröße besonders die dreidimensionale Formabweichung interessant. Die Fertigung von Mikrooptiken wird zur Zeit durch lithographische Methoden dominiert. Dies führt zu 2D-Strukturen mit relativ geringem Aspektverhältnis. Einige charakteristische Messgrößen sind z.B. Oberflächenrauheit und Gitterabstand [HCHDC06]. *Brinksmeier et al.* untersuchte Synchrotronspiegel mit einem Raster-

kraftmikroskop. Unterschiedliche Fertigungsverfahren der Präzisionsbearbeitung (Diamantfräsen, Polieren) wurden über die Oberflächenrauheit charakterisiert. Der Gitterabstand eines Reflexionsgitters für CO_2-Laser wurde untersucht [BHR98].

Mikrowerkzeuge stellen die Metrologie durch echte 3D-Strukturen vor große Herausforderungen. Die Absolutwerte und ihre Variablität beeinflussen direkt die Performance im Fräsprozess. Relevante Messgrößen beinhalten den effektiven Werkzeugdurchmesser, den Radius der Schneide, den Helixwinkel und die Spanwinkelrauheit [HCHDC06].

Im Zuge einer sich entwickelnden **Nanotechnologie** ergeben sich gerade in diesem Feld neue Aufgaben für die Metrologie. Im Vergleich zur Halbleiter- und Mikrotechnologie findet man im Bereich der Nanotechnologie eine deutlich größere Anzahl von Materialien in verschiedenen Formen und Ausprägungen. Messaufgaben können sich ebenso auf isolierte Einzelstrukturen wie auch auf Partikelcluster beziehen. Dabei kann es sich um glatte wie auch um strukturierte Oberflächen handeln [DDX+09].

Konkrete Messaufgaben sind [DDX+09]:

- Größenbestimmung von Nanopartikeln (Durchmesser)
- Abmaße von Nanodrähten (Länge, Durchmesser)
- Form von Partikeln und Strukturen (2D und 3D)
- Topologie von struktierten Oberflächen
- Dicke von dünnen Filmen auf glatten und strukturierten Oberflächen
- Porosität von Membranen
- Abstand (und Kraft) zwischen Molekülen

Tabelle 2.1 fasst Messaufgaben, -objekte und -bedingungen in den verschiedenen Technologiegebieten zusammen.

Oberflächen spielen in allen Bereichen der Mikro- und Nanotechnologie ein große Rolle. Aus diesem Grund wird der Bereich der Oberflächenmetrologie gesondert betrachtet. In der Literatur wird zwischen strukturierten Oberflächen und technischen Oberflächen unterschieden [EB99]. **Technische Oberflächen** sind definiert als Oberflächen, bei denen der Fertigungsprozess so optimiert wurde, dass eine Variation der Geometrie und/oder der oberflächennahen Materialeigenschaften eine bestimmte Funktion erfüllt. **Strukturierte Oberflächen** sind Oberflächen mit einem deterministischen Muster mit einem meist hohen Aspektverhältnis und geometrischen Merkmalen, die erzeugt wurden, um eine bestimmte Funktion zu generieren. Ein Beispiel, das bereits den Weg in

Tabelle 2.1: Überblick über Messaufgaben, -objekte und -bedingungen in den verschiedenen Technologiegebieten [DDX+09].

	MEMS-Technologie	Halbleitertechnologie	Nanotechnologie
Merkmale	Strukturen auf Masken, Wafern oder anderen Substraten; versch. Materialien und Größen	Strukturen auf Masken und Wafern	Strukturen auf Masken, Wafern oder anderen Substraten; Einzelstrukturen auf Substraten (adsorbiert)
Umgebungsbed.	Luft; Vakuum	Luft; (Vakuum)	Luft; Vakuum; UHV; Flüssigkeit
Materialien	Silizium und andere Halbleiter; Maskensubstrate; Metalle; Photoresist	Silizium; Keramiken; Glas; Metalle; Polymere; Maskensubstrate; Photoresist	Silizium und andere Halbleiter; Keramiken; Einzelmoleküle; organische, biologische Moleküle
Probenvolumen	Masken und Wafer bis zu 150 mm (oder mehr); Einzelstrukturen bis zu $50\,\mathrm{mm} \times 50\,\mathrm{mm}$; Dicke bis zu ca. 25 mm	komplette Masken oder Wafer (150 mm bis 300 mm)	Wafer, andere Substrate bis zu 4 Inch; spezielle Substrate bis zu $10\,\mathrm{mm} \times 10\,\mathrm{mm}$
Art der Messung	$2^1/_2$D - 3D; Aspektverhältnis bis zu 50 und mehr	2D; Aspektverhältnis < 1	$2^1/_2$(3)-D; Aspektverhältnis ≈ 1
Positionierbereich	bis zu $150\,\mathrm{mm} \times 150\,\mathrm{mm} \times 25\,\mathrm{mm}$	$175\,\mathrm{mm} \times 175\,\mathrm{mm}$ bis zu $300\,\mathrm{mm} \times 300\,\mathrm{mm}$	$100\,\mathrm{mm} \times 100\,\mathrm{mm} \times < 5\,\mathrm{m}$, meist $10\,\mathrm{mm} \times 10\,\mathrm{mm} \times 1\,\mathrm{mm}$
Messbereich	bis zu $50\,\mathrm{mm} \times 50\,\mathrm{mm} \times 25\,\mathrm{mm}$	$175\,\mathrm{mm} \times 175\,\mathrm{mm}$ für Masken; $25\,\mathrm{mm} \times 32\,\mathrm{mm}$ für Rohchips ($\times$ einige $10\,\mu\mathrm{m}$)	$100\,\mu\mathrm{m} \times 100\,\mu\mathrm{m} \times 10\,\mu\mathrm{m}$
Messaufgabe			
Abstand	$< 50\,\mathrm{mm}$	$< 175\,\mathrm{mm}$	$< 100\,\mu\mathrm{m}$
Breite	$> 1\,\mu\mathrm{m}$	$> 80\,\mathrm{nm}$	$< 1\,\mu\mathrm{m}$
Höhe	$< 1\,\mathrm{mm}$	$< 10\,\mu\mathrm{m}$	$< 250\,\mathrm{nm}$
Schichtdicke	$< 1\,\mu\mathrm{m}$	$> 2\,\mathrm{nm}$	$< 50\,\mathrm{nm}$
Rauheit/Textur	$< 1\,\mu\mathrm{m}$ rms	$< 10\,\mathrm{nm}$ rms	$< 50\,\mathrm{nm}$ rms
geforderte Genauigkeit	einige $100\,\mathrm{nm}$	einige nm	ein nm und darunter

den Alltag gefunden hat, ist der Lotuseffekt. Dabei handelt es sich um eine durch nanostrukturierte Oberflächen erzeugte Super-Hydrophobizität wie sie bei der Lotuspflanze beobachtet werden kann [BN97, NB97]. Auf Basis des bionischen Ansatzes konnte diese Fähigkeit sowie die mit ihr einhergehenden Selbstreinigungsfähigkeit auf technische Oberflächen übertragen werden. Ebenso spielt die Oberflächenrauheit eine große Rolle für die Effizienz von Solarzellen [TAO+00]. Rasterkraftmikroskope dienen der Charakterisierung und Modellierung von Nanofiltrationsmembranen und Fouling-Prozessen. Messgrößen sind hierbei Oberflächenrauheit sowie Porengröße und Porengrößenverteilung [SKMR98, HWMAD03]. Problematisch ist jedoch der Mangel an systematischen, effektiven und einfachen Methoden für die Messung und Charakterisierung von strukturierten Oberflächen [DBPD09].

Zukünftige Messaufgaben. Es besteht im Bereich der Nanometrologie allgemein und insbesondere im Bereich der 3D-Messungen eine Lücke zwischen den Anforderungen an die Messtechnik und der messtechnischen Realität. Analysen dieser und weiterer Wissenslücken im Bereich der Nanometrologie wurden in [HCHDC06, DBPD09] sowie durch die International Technology Roadmap for Semiconductors (http://www.itrs.net/) und innerhalb des EU-Projekts „Nanostrand“ durchgeführt. Abbildung 2.4 zeigt eine Übersicht zu vorhandenen gängigen Messsystemen der Mikro- und Nanometrologie. Die Abbildung stellt anschaulich dar, dass es zur Zeit keine Messsysteme gibt, die gleichzeitig eine hohe Auflösung und eine 3D-Messung realisieren. Speziell für die Rastersondenmikroskope ergibt sich im Rahmen der Entwicklung einer 3D-Messfähigkeit die Notwendigkeit zur Entwicklung von 3D-Messspitzen, von neuen Messstrategien und Modellen zur Datenfusion. Neben der 3D-Messfähigkeit muss ebenfalls die Messung von speziellen Materialien der Nanotechnologie, z.B. extrem weiche oder organische Materialien und Nanopartikel, untersucht werden. Bei diesen Materialien spielt die Interaktion zwischen Messspitze und Messoberfläche eine große und zu untersuchende Rolle. Zwei weitere große Aufgaben sind die Entwicklung von rauscharmen Rasterkraftmikroskopen, mit echter atomarer Auflösung, für kleine Messbereiche sowie die Entwicklung von Instrumenten für große Messbereiche, um großflächige Messungen mit Subnanometer-Genauigkeit durchführen zu können [DDX+09].

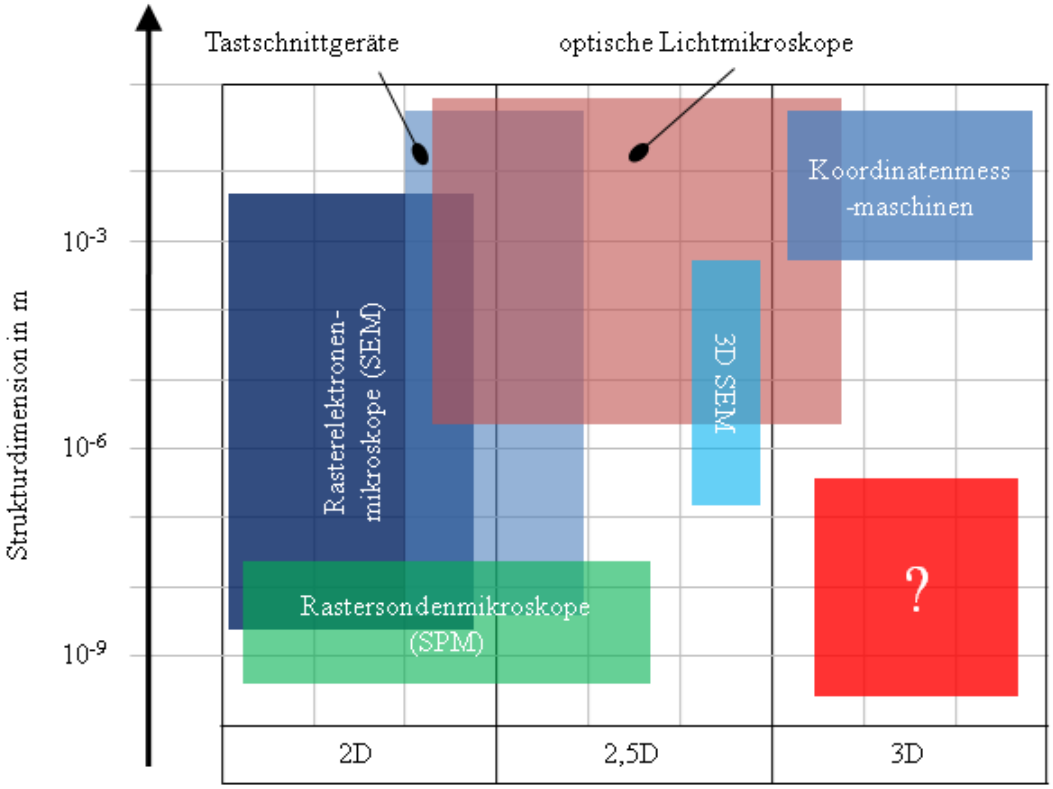


Abbildung 2.4: Einordnung der Rastersondenmikroskopie nach Auflösung und Strukturkomplexität (nach [HCHDC06, Bar05]).

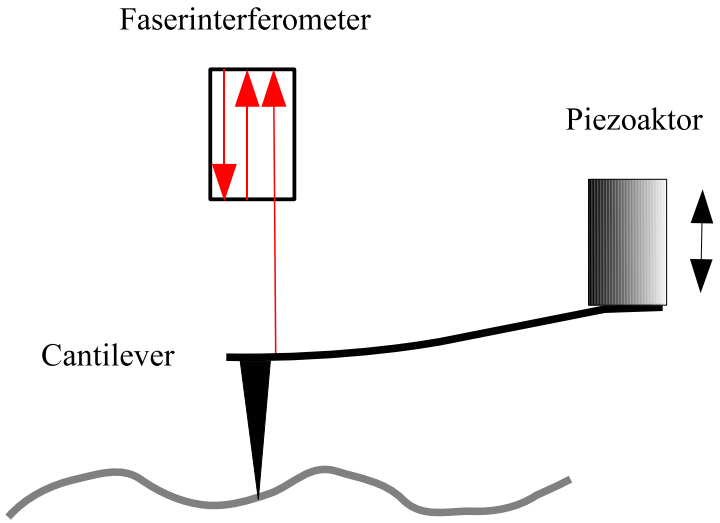


Abbildung 2.5: Schematischer Aufbau eines Rasterkraftmikroskops mit faserinterferometrischem Messprinzip.

2.2 Messprinzip, Betriebsarten, Messdynamik und Regelung von Rasterkraftmikroskopen

Im folgenden Abschnitt werden das Messprinzip, die Betriebsarten und die Messdynamik von Rasterkraftmikroskopen zum besseren Verständnis der anschließenden Kapitel kurz aufgearbeitet. Ebenso wird auf verschiedene Konzepte zur Regelung von Rasterkraftmikroskopen eingegangen.

Messprinzip. Vereinfachend kann man sich ein Rasterkraftmikroskop als ein Gerät vorstellen, dass, ähnlich einem Tastschnittgerät, die Probe mit einer sehr scharfen Messspitze abrastert. Die Messspitze befindet sich bei Rasterkraftmikroskopen am äußeren Ende eines Biegebalkens. Durch die Wirkung der Oberflächenkräfte auf die Cantileverspitze wird der Biegebalken ausgelenkt. Die Auslenkung des Biegebalkens wird optisch gemessen. Innerhalb eines geschlossenen Regelkreises wird mit Hilfe eines Piezoaktors die Auslenkung des Cantilevers konstant auf einem Sollwert gehalten. Diese Betriebsart nennt sich Kontaktmodus. Über die Auswertung der Stellsignale des Regelkreises beziehungsweise eine Messung der Auslenkung des Piezoaktors wird die Oberflächentopologie rekonstruiert. Eine schematische Darstellung der Hauptkomponenten eines Rasterkraftmikroskops mit faserinterferometrischem Messprinzip ist in Abbildung 2.5 zu sehen. Bei dem dargestellten Faserinterferometer handelt es sich um ein sogenanntes Fabrye-Pérot-Interferometer. Der einfallende Laserstrahl wird am Faserende reflektiert und erzeugt den ersten Teilstrahl. Eine weitere Reflektion des einfallenden Laserstrahls findet an der Rückseite des Cantilevers statt und erzeugt den zweiten Teilstrahl. Beide Teilstrahlen überlagern sich und interferieren.

Betriebsarten. Die Kontaktkraft zwischen der Messoberfläche und der Cantileverspitze hat einen nichtlinearen Charakter (siehe Abbildung 2.6). Die Betriebsarten eines Rasterkraftmikro-

skops lassen sich nach der Lage des Arbeitspunktes innerhalb der Kontaktkraftfunktion kategorisieren. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Kontakt- und Nichtkontaktmodus.
Im Kontaktmodus wird die Verschiebung beziehungsweise die Auslenkung des Cantilevers Δz, welche proportional der auf ihn wirkenden Kontaktkraft ist, zur Kraftmessung genutzt. Der Proportionalitätsfaktor zwischen der wirkenden Kraft F und der auftretenden Auslenkung Δz ist die Federkonstante des Cantilevers k_c. Wie bereits bei der Erläuterung des Messprinzips dargelegt, wird die Auslenkung des Cantilevers durch einen Regelkreis konstant gehalten. Typische Messgeschwindigkeiten im Kontaktmodus bewegen sich im Bereich von $75\,\mu\mathrm{m/s}$ [SSS04b]. Die Auflösung von atomaren Strukturen ist im Kontaktmodus nicht möglich [YK08].
Im Nichtkontaktmodus wird die Interaktion zwischen dem oszillierenden Cantilever und der Messoberfläche zur Messung genutzt. Dabei wird, je nach Art der Interaktion, zwischen „echtem“ Nichtkontaktmodus und dem Intermittent beziehungsweise Tapping Modus unterschieden. Beim „echten“ Nichtkontaktmodus findet keine Berührung statt. Beim Tapping Modus findet ein zeitweiser Kontakt statt. Im Nichtkontaktmodus gibt es zwei Methoden zur Regelung: Amplitudenmodulation (AM) und Frequenzmodulation (FM). Bei der Amplitudenmodulation wird der Cantilever durch einen kleinen Piezoaktor in seiner Resonanzfrequenz f_0 zu einer Schwingung mit konstanter Amplitude A_0 angeregt. Bei Annäherung an die Messoberfläche wird die Amplitude gedämpft. Zur Messung wird die Amplitude und somit der Abstand zwischen Cantileverspitze und Messoberfläche innerhalb eines geschlossenen Regelkreises konstant gehalten. Bei der Frequenzmodulation wird nicht die Dämpfung der Amplitude, sondern die Verschiebung der Frequenz durch die Annäherung an die Oberfläche als Regelgröße verwendet. Bei beiden Betriebsmodi erfolgt die Änderung der Regelgröße nicht zeitgleich mit einer Änderung des Abstands zwischen Cantileverspitze und Messoberfläche, sondern in gewissen Zeitabständen. Bei der Amplitudenmodulation ist der Zeitabstand:

$$t_{AM} \sim \frac{2Q}{f_0}$$

durch den Gütefaktor Q und die Resonanzfrequenz f_0 bestimmt [YK08]. Bei der Frequenzmodulation ist die Änderung der Eigenfrequenz definiert als:

$$t_{FM} \sim \frac{1}{f_0}$$

Damit ist die mögliche Messgeschwindigkeit im FM-Modus deutlich höher als beim AM-Modus. Der FM-Modus ist der bevorzugte Messmodus bei Messungen im Vakuum. Typische Messgeschwindigkeiten liegen zwischen 180 und $250\,\mu\mathrm{m/s}$ [YK08].

Messdynamik. Im folgenden Abschnitt wird die Messdymanik von Rasterkraftmikroskopen näher erläutert. Dabei werden hauptsächlich die Dynamik des Cantilevers und die auftretenden Kontaktkräfte diskutiert. Der Cantilever eines Rasterkraftmikroskops kann als ein Biegebalken aufgefasst werden. Es sind unendlich viele Eigenfrequenzen und Eigenformen ausbreitungsfähig. Die Lage der Eigenfrequenzen hat eine entscheidende Bedeutung für die Dynamik des Rasterkraft-

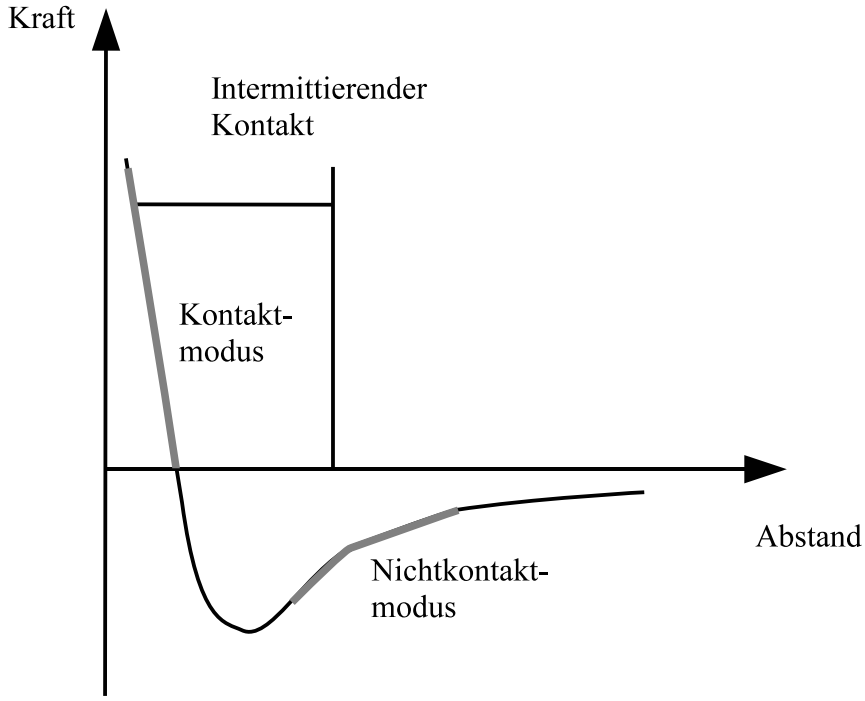


Abbildung 2.6: Darstellung der Kraftabstandsfunktion und der Lage der Arbeitsbereiche der verschiedenen Betriebsarten (nach Danzebrink et al. [DKW$^+$06]).

mikroskops. Einen Biegebalken kann man als Euler-Bernoulli-Balken unter Vernachlässigung der Dämpfung wie folgt mathematisch beschreiben:

$$\frac{\partial^2 w\,(x,t)}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} = 0 \tag{2.1}$$

Die Randbedingungen zur Lösen der Gleichung sind: ein feste Einspannung für $x = 0$ sowie ein freies Ende bei $x = L$ (mit L als Länge des Cantilevers). Die Lösung dieser Gleichung kann für einfache rechteckige Querschnitte analytisch erfolgen [Inm01]. Somit wird für den freien Cantilever die n-te Eigenform als:

$$\phi_n(x) = cosh(\beta_n x) + cos(\beta_n x) - \sigma_n(sinh(\beta_n x) + sin(\beta_n x)) \tag{2.2}$$

mit $\sigma_n = \frac{sinh(\beta_n L) - sin(\beta_n L}{cosh(\beta_n L) + cos(\beta_n L)}$ und $(\beta_n L)_{n=1\ldots3} = [1{,}8751; 4{,}6941; 7{,}8548]$ berechnet.

Die Lage der Eigenfrequenzen ergibt sich zu:

$$\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{\frac{EI_z}{\rho A}} \tag{2.3}$$

Es kann unter Vernachlässigung der höheren Modi ein Ersatzsystem, welches den Cantilever als Biegefeder betrachtet, erstellt werden [BCK05]:

$$m^* \frac{d^2 Z_c\,(t)}{dt^2} + \gamma_D \frac{dZ_c(t)}{dt} + k_c Z_c(t) = F(t) \tag{2.4}$$

Hierbei ist zu beachten, dass die Masse der Cantileverspitze mit Hilfe eines Korrekturterms berücksichtigt werden muss:

$$m^* = 0.2427 m_c + m_t \tag{2.5}$$

Für ein solches Ersatzsystem kann eine Federkonstante berechnet werden. Man muss grundsätzlich zwischen Cantilevern für den Kontaktmodus und Cantilevern für den Nichtkontaktmodus unterscheiden. Um die Probenoberfläche nicht zu beschädigen, haben Cantilever für den Kontaktmodus eine deutlich geringere Federkonstante als Cantilever für den Nichtkontaktmodus. Die erste Resonanzfrequenz liegt aufgrund der geringeren Federkonstante bei Cantilevern für den Kontaktmodus im Bereich von $\geq 10\,\mathrm{kHz}$. Während die erste Resonanzfrequenz von Nichtkontaktmodus-Cantilevern bei Werten von üblicherweise $> 100\,\mathrm{kHz}$ liegt. Es wurden in der Vergangenheit verschiedene Methoden (Added-Mass-Methode, Sader-Methode, Thermal-Noise-Methode, Kalibrierung mit einem Referenzcantilever) [BCK05] zur Kalibrierung der Federkonstante entwickelt. Die Thermal-Noise-Methode und die Sader-Methode werden in dieser Arbeit genutzt und im Folgenden genauer erläutert.
Die Methode von *Sader* [Sad98, Sad99] kann die Federkonstante eines Cantilevers mit rechteckigem Querschnitt aus der Lage der ersten Resonanzfrequenz und dem Gütefaktor Q bestimmen. Zusätzlich müssen noch die Breite b und Länge des Cantilevers L, sowie die Dichte des umgebenden Mediums ρ_f bekannt sein. Mit Hilfe dieser Parameter kann nun die Federkonstante auf Basis einer hydrodynamischen Funktion bestimmt werden:

$$k_c = 0.1906 * \rho_f b^2 L Q \Gamma_i(Re) {\omega_0}^2 \tag{2.6}$$

mit der Reynoldszahl Re als:

$$Re = \frac{\rho_f \omega_0 b^2}{4\eta} \tag{2.7}$$

Eine elegante und häufig genutzte Methode ist die Thermal-Noise-Methode. Bei dieser Methode wird die Federkonstante des Cantilevers über das quadratische Mittel der Intensität des thermischen Rauschens bestimmt. Für eine ideale Feder gilt:

$$k_c = \frac{k_B T}{\langle Z_c^2 \rangle} \tag{2.8}$$

Für einen rechteckigen Cantilever gilt für den i-te Mode die Beziehung:

$$\left\langle Z_i^2 (L) \right\rangle = \frac{12 k_B T}{k_c {\alpha_i}^4} \tag{2.9}$$

Nach der Beschreibung der Dynamik von Cantilevern von Rasterkraftmikroskopen erfolgt nun eine Beschreibung der Kontaktkräfte. Die Kräfte, die bei Annäherung und Kontakt zwischen Cantileverspitze und Probenoberfläche auftreten, sind von komplexer und nichtlinearer Natur. Die auftretenden Kräfte variieren je nach Materialpaarung, Geometrie, Umgebungsparametern (z.B.

Luftfeuchte) und dem umgebenden Medium (Luft, Wasser, Vakuum). Die dominierenden Kräfte bei der Interaktion von Cantileverspitze und Probenoberfläche sind die anziehend wirkende Van-der-Waals-Kraft und die abstossend wirkende Pauli-Kraft. Die Van-der-Waals-Kraft ist wiederum eine aus drei unterschiedlichen Kräften zusammengesetzte Kraft. Dabei handelt es sich um das Keesom-Potential $w_K(r)$, das Debye-Potential $w_D(r)$ und das London-Potential $w_L(r)$. Alle drei Kräfte sind über den Zusammenhang: $\frac{1}{r^6}$ mit dem Abstand r verknüpft [BCK05]. Die Van-der-Waals-Kraft ist typischerweise über einen Abstand von $100\,\mathrm{nm}$ aktiv. Ihr Potential bewegt sich im Bereich von $30\,\mathrm{eV}$ beziehungsweise $\sim 10\,\mathrm{nN}$ [YK08]. Eine Einführung in die Thematik der Van-der-Waals-Kraft kann in [Isr92] gefunden werden. Die Pauli-Kraft wirkt auf kleineren Distanzen als die Van-der-Waals-Kraft. Die Van-der-Waals-Kraft und die Pauli-Kraft können zusammen als Lennard-Jones-Potential [LJ31] modelliert werden:

$$V(r) = -4\epsilon\left[\left(\frac{\sigma}{r}\right)^6 - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12}\right]$$

ϵ ... Tiefe des Potentialminimums
σ ... Position des Potentialminimums
r ... Abstand der Atome

Die Berührung zwischen Cantileverspitze und Probenoberfläche führt zu elastischen Deformationen beider Körper. In der Vergangenheit wurden verschiedene Modelle zur Beschreibung der elastischen Deformationen der Probenoberfläche entwickelt. Die wichtigsten Theorien sind die Theorie nach *Hertz* [Her82], nach *Derjagin-Müller-Toporov* (DMT) [DMT75, MYD80, MDT83] und nach *Johnson-Kendall-Roberts* (JKR) [JKR71]. Bei der JKR-Theorie und der DMT-Theorie werden die zwischen Cantileverspitze und Probenoberfläche wirkenden Adhäsionskräfte außerhalb (DMT) und innerhalb (JKR) der Kontaktfläche berücksichtigt. Die Hertzsche Pressung modelliert allein die elastische Deformationen. In Tabelle 2.2 werden die Gleichungen der drei Theorien gegenüber gestellt [BCK05].

Tabelle 2.2: Gegenüberstellung der verschiedenen Kontaktregime im Hinblick auf die Beschreibung des Kontaktradius a, der elastischen Deformation der Probe δ und der Adhäsionskraft F_{ad} (mit dem Spitzenradius R, der Adhäsionsarbeit pro Einheitsfläche W, dem reduzierten Elastizitätsmodul E_{red} und der durch die Cantileverspitze aufgebrachten Kraft F).

	Hertz	DMT	JKR
a	$\sqrt[3]{\frac{RF}{E_{red}}}$	$\sqrt[3]{\frac{R}{E_{red}}(F+2\pi RW)}$	$\sqrt[3]{\frac{R}{E_{red}}\left(F+3\pi RW+\sqrt{6\pi RWF+(3\pi RW)^2}\right)}$
δ	$\frac{a^2}{R}=\left(\frac{F^2}{RE_{red}^2}\right)^{\frac{1}{3}}$	$\frac{a^2}{R}=\frac{(F+2\pi RW)^{\frac{2}{3}}}{\sqrt[3]{RE_{red}^2}}$	$\frac{a^2}{R}=\frac{2}{3}\sqrt{\frac{6\pi Wa}{E_{tot}}}$
F_{ad}	0	$2\pi RW$	$\frac{3\pi RW}{2}$

In der Praxis sollte die Hertzsche Pressung nur angewendet werden, wenn die maximale durch den Cantilever aufgeprägte Kraft deutlich höher ist als die Adhäsionskraft. Die JKR-Theorie sollte in Fällen von großen Spitzenradien und einer weichen Probenoberfläche mit hohen Adhäsionskräf-

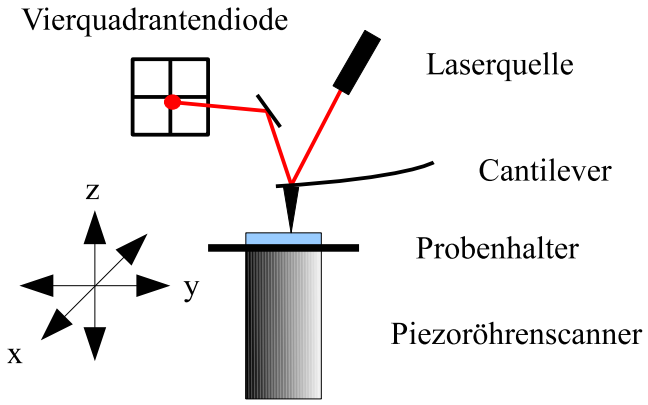


Abbildung 2.7: Schematischer Aufbau eines Rasterkraftmikroskops mit Piezoröhrenscanner.

ten genutzt werden. Das DMT-Modell sollte bei kleinen Spitzenradien und steifen Probenoberflächen mit kleinen Adhäsionskräften angewendet werden. Maugis [Mau92] zeigt, dass die scheinbar widersprüchlichen Theorien von DMT und JKR nur Grenzfälle der gleichen Theorie sind. Den Übergang zwischen den Theorien beschreibt er über den Parameter λ:

$$\lambda = \frac{2{,}06}{D_0} \sqrt[3]{\frac{RW^2}{\pi E_{red}^2}}$$

Das Modell nach Maugis zeigt, dass eine exakte Bestimmung des reduzierten Elastizitätsmoduls E_{red} und der Adhäsionsarbeit W allein auf Basis einer Kraft-Abstand-Kurve nicht möglich ist [BCK05]. Die Adhäsionskraft ist in Wirklichkeit eine zusammengesetzte Kraft, welche bei Messungen an der Luft einerseits aus der Van-der-Waal-Kraft und andererseits aus der Kapillarkraft gebildet wird. Elektrostatische Kräfte können bei sehr trockener Luft und bei Messungen von Isolatoren auftreten. Kapillarkräfte entstehen zwischen Cantileverspitze und Probenoberfläche, da bei Messungen an der Luft immer ein mikroskopischer adsorbierter Wasserfilm auf allen Oberflächen präsent ist. Die Schichtdicke des Wasserfilms und ebenso die Stärke der Interaktion ist abhängig von der Luftfeuchte. Bei der Berührung der Cantileverspitze mit einem adsorbierten Wasserfilm ausreichender Dicke bildet sich ein Meniskus aus, welcher die Cantileverspitze zur Messoberfläche zieht. Dieser Effekt ist stärker als die Van-der-Waals-Kraft und alle anderen Oberflächenkräfte [HBA+01].

Regelung von Rasterkraftmikroskopen. Konventionelle Rasterkraftmikroskope nutzen Piezoröhrenscanner als Aktoren. Vorteilhaft an Piezoaktoren ist das Fehlen von Reibung und die schnelle Ansprechzeit. Nachteilig für die Regelbarkeit sind die nichtlinearen Eigenschaften von Piezomaterialen, wie Kriechen und Hysterese. Piezoaktoren können als schwingungsfähige Systeme zweiter Ordnung modelliert werden [AAPS07]. Bei konventionellen Gerätedesigns führt ein einziger Piezoröhrenscanner die Scanbewegung in allen drei Achsen gleichzeitig aus (siehe Abbildung 2.7). Diese Art von Design führt zu erheblichen Problemen wie z.B. das Übersprechen der

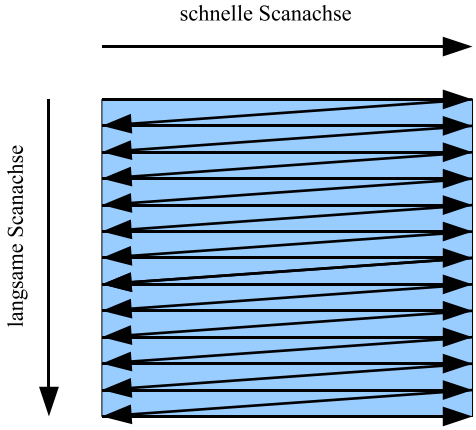


Abbildung 2.8: Laterale Scanbewegung bei einem Rasterscan.

Achsen, Schwingungen, Drift und eine niedrige mögliche Bandbreite der Regelung. Dabei muss für die Ausführung der lateralen Scanbewegung in X- und Y-Richtung ein Sägezahnprofil abgefahren werden (siehe Abbildung 2.8). Bei experimentellen High-Speed-AFMs wird aus diesen Gründen die Aktorik für die einzelnen Achsen getrennt, um insgesamt eine höhere Bandbreite und Messgeschwindigkeit zu erreichen, sowie um gerätespezifische Artefakte zu vermeiden. Nicht alle kommerziellen Rasterkraftmikroskope sind mit Sensoren zur Positionsmessung ausgestattet. Beim Fehlen solcher Sensoren ist nur ein Betrieb innerhalb eines offenen Regelkreises, in Form einer Steuerung möglich. Das vorherrschende Regelungskonzept bei konventionellen, kommerziellen Rasterkraftmikroskopen ist die Regelung mittels eines PI-Reglers. Bei der Verwendung eines PI-Regler muss die Grenzfrequenz des geschlossenen Regelkreises deutlich unter den Resonanzfrequenzen des Piezoaktors liegen. Dies führt zu einer geringen Verstärkung im niederfrequenten Bereich. Durch den Einsatz von PII-Reglern kann zum Preis einer geringeren Stabilität eine höhere Verstärkung im niederfrequenten Bereich erzielt werden. Der Einsatz eines Differentialgliedes in Form eines PID-Reglers ist problematisch, da die Modellierung von Piezoaktoren mit beträchtlichen Unsicherheiten verbunden ist. Die Möglichkeiten zur Bandbreitenerhöhung durch einen PID-Regler sind durch das thermische Rauschen des Cantilevers und das Rauschen des optischen Detektionssystems limitiert [AAPS07]. Durch die Anwendung von modellbasierten Reglerkonzepten konnten beträchtliche Verbesserungen gegenüber konventionellen PI-Reglern erzielt werden. Problematisch bei der Erstellung von einer modellbasierten Regelung sind vor allem die Unsicherheiten in der Regelstrecke durch den Piezoaktor und den Wechsel des Cantilevers, sowie Änderungen in der Übertragungsfunktion durch unterschiedliche Probenmaterialien und Materialpaarungen. Die Methoden zur Verbesserung zielen meistens auf eine bessere Modellierung oder robustere Regler höherer Ordnung ab [AAPS07]. Ein Großteil der Untersuchungen zur Verbesserung der Messdynamik von Rasterkraftmikroskopen bezieht sich auf die Optimierung des Führungsverhaltens der lateralen Achsen. Hierfür wurden Feedforward-Methoden zur Steuerung im offenen Regelkreis entwickelt, welche speziell die Geräteartefakte durch den Einsatz von Pie-

zoröhrenscannern minimieren sollen [CD99, CSD01, SS04]. Die Einführung von X-Y-Tischen mit Sensoren führte zur Implementierung von Feedback-Methoden [SSCS02, SS05]. Es wurden Methoden mit einer Kombination von Feedback und Feedforward für die gleichzeitige Regelung sowohl der lateralen Achsen als auch der vertikalen Achse entwickelt [SSS04a, RSSA05, SAS04]. Zur Gewinnung der Übertragungsfunktion der Regler werden moderne Regelungskonzepte eingesetzt. Zur Gewinnung von Feedforward-Elementen für die Steuerung der lateralen Scanbewegung im offenen Regelkreis werden inversionsbasierte Methoden genutzt [CSD01]. Zur Erstellung von Feedback-Reglern sowie kombinierten Feedback/Feedforward-Reglern wird vor allem das H_∞-Theorem verwendet [SSS04a, SAS04]. Für diese Aufgabe finden auch l_1-Regler [RSSA05] sowie inversionbasierte Methoden [CSD01] ihre Anwendung.

2.3 Metrologische Rasterkraftmikroskope

Die Längenmessung von Rasterkraftmikroskope mit integriertem Laserinterferometer kann über die Laserwellenlänge direkt auf die Meterdefinition zurückgeführt werden. Diese Rasterkraftmikroskope werden „metrologische Rasterkraftmikroskope (MAFM)“ genannt. Hinsichtlich des Stands der Technik im Bezug auf metrologische Rasterkraftmikroskope ist ein Blick auf die Fähigkeiten der nationalen Metrologie-Institute (engl.: National Measurement Institute, kurz: NMI) sinnvoll. Einen internationalen Überblick über die Messunsicherheiten der NMI bietet die Tabelle 2.3.

Das schweizer Bundesamt für Metrologie (METAS) verfügt über ein metrologisches Rasterkraftmikroskop, welches aus einer Kombination aus einem kommerziellen Rasterkraftmikroskop (Dimension 3500 von Digital Instruments) mit einer Linearführung mit großer Länge besteht. Die Linearführung wird durch Festkörpergelenke in einer Doppelparallelogramm-Bauweise realisiert. Der nominelle Bewegungsbereich beträgt $70\,\mu\mathrm{m}$ und kann über einen Hebel um den Faktor 6 vergrößert werden ($380\,\mu\mathrm{m}$). Mit einem Abbe-Versatz von kleiner $1\,\mathrm{nm}$ ist der resultierende Messfehler kleiner als $3\,\mathrm{nm}$ über den Messbereich. Der Tisch wird durch einen Piezoaktor angetrieben. Die Längenmessung erfolgt gleichzeitig durch kapazitive Sensoren und differentielle Planspiegelinterferometer. Über das differentielle Planspiegelinterferometer werden Drifterscheinungen zwischen der Linearführung und dem AFM-Messkopf vollständig kompensiert. Dabei werden die Signale der kapazitiven Sensoren zur Positionsregelung und die Messsignale des Laserinterferometers zur Messdatenerfassung verwendet. Der AFM-Messkopf besitzt einen parallelogrammförmigen Aufbau mit einem Messbereich von $70\,\mu\mathrm{m} \times 70\,\mu\mathrm{m} \times 7\,\mu\mathrm{m}$ (X-Y-Z). Die Längenmessung erfolgt bei dem AFM-Messkopf ebenfalls durch kapazitive Sensoren [MT98].

Das italienische Metrologie-Institut, das Istituto di Metrologia „Gustavo Colonnetti“ (IMGC), entwickelte ein AFM mit einem Messbereich von $30\,\mu\mathrm{m} \times 30\,\mu\mathrm{m} \times 18\,\mu\mathrm{m}$. Bei dem AFM handelt es sich um ein System mit bewegter Probe und fester Messspitze. Die Struktur des Systems be-

steht aus drei motorisierten Mikrometerschrauben, welche eine beweglich gelagerte Metallplatte stützen. Auf der Metallplatte wiederrum ist eine kugelgelagerte X-Y-Miniaturführung angebracht, welche durch piezogetriebene Biegeaktoren bewegt wird. Die Piezobiegeaktoren erlauben eine Feinbewegung im Bereich von $30\,\mu\mathrm{m} \times 30\,\mu\mathrm{m}$, die durch den Einsatz der Mikrometerschrauben auf einen Grobbereich von $6\,\mathrm{mm} \times 6\,\mathrm{mm}$ erweitert wird. Auf der X-Y-Führung befindet sich die Z-Führung, welche aus zwei durch piezoelektrische Bimorphaktoren bewegten Platten besteht. Die Längenmessung in Z-Richtung erfolgt durch kapazitive Sensoren. Die Längenmessung in den lateralen Achsen erfolgt durch zwei Heterodyn-Interferometer [Pic01].

Das britische Metrologie-Institut, das National Physical Laboratory (NPL), adaptierte einen kommerziellen AFM-Messkopf mit einem Messbereich von $5\,\mu\mathrm{m}$ in Z-Richtung. Die Bewegung in den lateralen Achsen erfolgt durch eine Festkörperführung mit einem Bewegungsbereich von $100\,\mu\mathrm{m}$ in beiden lateralen Achsen. Drei differentielle Planspiegelinterferometer dienen zur Längenmessung in allen drei Raumachsen [HJ05].

Das US-amerikanische Metrologie-Institut, das National Institute of Standards and Technology (NIST), verfügt über eine MAFM mit einem Messbereich von $50\,\mu\mathrm{m} \times 50\,\mu\mathrm{m} \times 5\,\mu\mathrm{m}$. Zur lateralen Bewegung der Probe wird ein Messtisch mit einer Festkörperführung und einem piezoelektrischen Antrieb verwendet. Zur vertikalen Bewegung wird eine Queensgate-S300-Führung mit einem Piezoaktor und einem kapazitiven Wegaufnehmer genutzt. Zur Verschlankung und Vereinfachung des AFM-Messkopfes werden piezoresistive Cantilever mit integriertem Wegaufnehmer verwendet. Die laterale Längenmessung erfolgt interferometrisch. Die vertikale Längenmessung erfolgt über den kapazitiven Sensor [SMAW94].

Das Nationale Metrologie-Institut von Japan (NMIJ/AIST) hat eine MAFM mit einem Messbereich von $17{,}5\,\mu\mathrm{m} \times 17{,}5\,\mu\mathrm{m} \times 2{,}5\,\mu\mathrm{m}$ entwickelt. Dabei wird ein kommerzieller, monolithischer XY-Tisch (Physik Instrumente, P-730) für die laterale Bewegung und ein Piezoröhrenscanner für die vertikale Bewegung eingesetzt. Ein dreiseitiger Spiegelblock wird gleichzeitig als Messspiegel für die drei Laserinterferometer und als Probenhalter eingesetzt.

Die Physikalisch Technische Bundesanstalt hat zwei MAFM in Betrieb, darunter ein modifiziertes Veritek AFM von Carl Zeiss. Das Veritek besteht aus einer 3D-Festkörperführung aus Invar. Der Messbereich in (X,Y,Z)-Richtung beträgt $70\,\mu\mathrm{m} \times 15\,\mu\mathrm{m} \times 15\,\mu\mathrm{m}$ mit einer Auflösung von $1\,\mathrm{nm}$, $0{,}25\,\mathrm{nm}$ und $0{,}25\,\mathrm{nm}$. Die Wegmessung erfolgt interferometrisch [BGH+98].

Zur Längenmessung können aufgrund der hohen Anforderungen an die Auflösung bei MAFMs nur Laserinterferometer und kapazitiven Sensoren eingesetzt werden (Überblick über Messprinzipien - siehe Tabelle 2.4). MAFM werden in der Literatur [DPD+04a] auf Basis der Betriebsart der Laserinterferometer in zwei Gruppen einteilt. Die erste Gruppe benutzt Laserinterferometer nur zur Kalibrierung, während kapazitive Wegaufnehmer als Positionssensoren während der Messung

dienen. Hier werden die Laserinterferometer im Kalibriermodus betrieben. Die zweite Gruppe benutzt die Laserinterferometer direkt zur Positionsmessung und -kontrolle. Deshalb werden die Laserinterferometer im direktem Messmodus betrieben. Beide Vorgehensweisen haben Vor- und Nachteile. Der Betrieb im Kalibriermodus reduziert den Einfluss der Nichtlinearitäten der Laserinterferometer auf die Messung, erfordert allerdings wiederholte Kalibrierung. Während ein Betrieb der Laserinterferometer im direktem Messmodus eine Untersuchung der Nichtlinearitäten der Laserinterferometer erfordert. Durch den Einsatz von Werkstoffen mit einem geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, wie z.B. Invar oder Zerodur, sowie durch einen kurzen metrologischen Rahmen erreichen MAFM eine hohe Temperaturstabilität. Außerdem wird versucht den Abbe-Fehler möglichst klein zu halten. Neben dem Abbe-Fehler müssen nicht gewollte Rotationsbewegungen ebenfalls minimiert werden. Bei allen MAFM wird versucht die Bewegungsachsen mechanisch zu entkoppeln, um ein Übersprechen zwischen den Achsen zu minimieren. In vielerlei Hinsicht sind MAFM kommerziellen Modellen überlegen und repräsentieren eine zukünftige AFM-Generation.

Die meisten MAFM benutzen Festkörperführungen und sind deshalb im Messbereich beschränkt. Um dieses Problem zu umgehen, wurde eine neue Klasse von Rasterkraftmikroskopen für großflächige Messungen entwickelt (Überblick - siehe Tabelle 2.5). An dieser Stelle wird im Hinblick auf ältere Entwicklungen, wie die Molecular Measuring Machine (M^3) [Tea89, Kra05], auf die Literatur verwiesen.

Der Lehrstuhl für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau entwickelte in Zusammenarbeit mit der Professur für Mess- und Informationstechnik der Helmut-Schmidt-Universität die Nanopositionier- und Nanomessmaschine NMM-1, die mittlerweile von SIOS Messtechnik GmbH [SIO06] vertrieben wird. Die Weiterentwicklung der NMM-1 wird von der deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 662 gefördert. Die NMM-1 hat einen Messbereich von $25 \times 25 \times 5\,\mathrm{mm}^3$ mit einer Auflösung von $0{,}1\,\mathrm{nm}$. Die kombinierte Messunsicherheit liegt bei unter $10\,\mathrm{nm}$ [JMHS02]. Die Längenmessung in den drei Raumachsen erfolgt durch Homodyn-Laserinterferometer. Der Messtisch, die sogenannte Spiegelecke, dient gleichzeitig als Träger für die Messspiegel der Laserinterferometer. Auf diese Weise treffen sich die Laserinterferometer in einem virtuellen Punkt, dem Antastpunkt für den Messsensor. Durch dieses Aufbauprinzip wird in allen Dimensionen das Abbe'sche Komparatorprinzip eingehalten. Die Verkippung des Tisches wird durch Autokollimationssensoren gemessen und durch die Lageregelung der NMM ausgeregelt. Aktuell wird der Einsatz von Zwei- oder Dreistrahlinterferometern zur Messung der Verkippung und Rotation untersucht [JTB+06]. Der Messtisch wird durch Kreuzrollenführung der Firma Schneeberger geführt. Der Antrieb erfolgt durch Tauchspulenantriebe der Firma Kimco. Die NMM besitzt Sensoren für Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck zur Korrektur der Laserinterferometer. Durch den Einsatz von Werkstoffen mit geringem thermischen Ausdehnungskoeffizient (Invar, Zerodur) ist eine hohe Stabilität gegenüber Temperaturschwankungen gegeben. Zur Minimierung der thermischen Verlustleistung der Antriebe wird eine

Tabelle 2.3: Messunsicherheit (bei einem Konfidenzniveau von 95%) angegeben durch die nationalen metrologischen Institute für ihre metrologischen SFMs im Jahr 2006 (Anmerkung: Variablen p,l,h in nm) [DKW+06].

Nationales Metrologie-Institut	Instrument		Messunsicherheit			Ergänzungen
	Messbereich $X \times Y \times Z$ in $\mu\mathrm{m}$	Rückführbarkeit	2(3) D laterale Entfernung in nm	Durchschn. Pitch periodischer Strukturen in nm	Stufenhöhe in nm	
AIST/NMIJ, Japan	100 x 100 x 12	Homodyn-Laserinterferometer in 3 Achsen		2 x $(0{,}16^2$ + (9,9 x 10^{-6} x $p)^2)^{1/2}$	2 x $(0{,}31^2$ + (2,6 x 10^{-5} x $h)^2$ $)^{1/2}$	spezialgefertigt
CMS/ITRI, Taiwan	100 x 100 x 10	Homodyn-Laserinterferometer in 3 Achsen		0,5		spezialgefertigt mit einen kommerziellen Messkopf
DFM, Dänemark	70 x 70 x 6	Gitter und Stufenhöhe zertifiziert durch METAS und PTB	0,0015 x l	0,0015 x l	$(0{,}26^2$ + 1,6 x 10^{-6} $h)^{1/2)}$	
IMGC, Italien	30 x 30 x 18	Kapazitive Sensoren mit Kalibrierung der Laserinterferometer	3 + 1 x 10^{-3} x l		2 + 2 x 10^{-3} x h	Eigenbau, Daten aus Literatur entnommen
KRISS, Korea	100 x 100 x 12	Heterodyn-Laserinterferometer in x/y; kalibrierte kapazitive Wegaufnehmer in z	$(4{,}3^2$ + (2,8 x 10^{-4} x $l)^2)^{1/2}$	$(0{,}22^2$ + (2,8 x 10^{-4} x $p)^2)^{1/2}$	$(0{,}19^2$ + (7,8 x 10^{-4} x $h)^2)^{1/2}$	modifiziertes kommerzielles Instrumente
LNE, France	$3 \cdot 10^5$ x $3 \cdot 10^5$ x 50	kalibrierter kapazitiver Wegaufnehmer für die Z-Achse, Interferometer und 2D optischer Encoder für die lateralen Achsen				Eigenbau, noch nicht vollständig charakterisiert
METAS, Schweiz	Spitze: 70 x 70 x 5, Probe: 380 (x)	Homodyn-Laserinterferometer	$(1^2$ + (5 x 10^{-5} x $l)^2)^{1/2}$	5 x 10^{-5} x p	$(1^2$ + (5 x 10^{-3} x $h)^2)^{1/2}$	kommerzielles, metrologischer AFM-Messkopf und eine lange Linearführung
MIKES, Finnland	100 x 100 x 16	Positionssensoren durch Interferometer und 1D-Gitter kalibriert	$(3^2$ + (1 x 10^{-3} x $l)^2)^{1/2}$		$(0{,}5^2$ + (2 x 10^{-4} x $h)^2)^{1/2}$	kommerzielles SFM; vorläufige, noch laufende Charakterisierung
NIM, China	70 x 15 x 8	Homodyn-Laserinterferometer in allen 3 Achsen	$(2^2$ + (1 x 10^{-4} x $l)^2)^{1/2}$	$(0{,}5^2$ + (1 x 10^{-4} x $p)^2)^{1/2}$	$(1^2$ + (1 x 10^{-4} x $h)^2)^{1/2}$	modifiziertes kommerzielles Instrument
NIST, USA	50 x 50 x 5	Heterodyn-Laserinterferometer in x/y; kalibrierter kapazitiver Wegaufnehmer		$(3^2$ + (2 x 10^{-3} x $p)^2)^{1/2}$	$(0{,}1^2$ + (1 x 10^{-3} x $h)^2)^{1/2}$	kommerzieller SFM Messkopf
NMI-VSL, Niederlande	100 x 100 x 20	Heterodyn-Laserinterferometer in drei Achsen	Ziel ist $1\mathrm{nm}$			metrologischer Rahmen im Hause gefertigt; Messkopf und Führungen kommerziell
NPL, Großbritannien	100 x 100 x 5	Heterodyn-Laserinterferometer in drei Achsen		$(0{,}2^2$ + (2 x 10^{-4} x $p)^2)^{1/2}$	$(0{,}4^2$ + (6 x 10^{-3} x $h)^2)^{1/2}$	modifiziertes kommerzielles Instrument
PTB, Deutschland	75 x 15 x 15	Homodyn-Laserinterferometer in drei Achsen			$(1^2$ + (5 x 10^{-4} x $h)^2)^{1/2}$	modifiziertes kommerzielles Instrument
PTB, Deutschland	25000 x 25000 x 5000	Homodyn-Laserinterferometer in 3 Achsen		$(0{,}002^2$ + (3 x (9,9 x 10^{-5} x $p^2))^{1/2}$	$(0{,}6^2$ + x (7,5 x 10^{-5} x $h)^2$ $)^{1/2}$	Kombination aus SFM, Piezoversteller und NMM

Gewichtskraftkompensation für den Messtisch eingesetzt. Zur Reduzierung des Wärmeeintrags durch die Winkelsensoren werden diese durch eine externe LED über Lichtwellenleiter versorgt. In ersten Versuchen wurde ein kommerzielles AFM (SIS Ultraobjective) adaptiert [HHJ04]. Es folgte die Entwicklung eines eigenen AFM-Messkopfs auf Basis eines Laserfokussensors [MHR+05]. Besonders erwähnenswert ist die Entwicklung eines interferometrischen AFM-Messkopfes mit gleichzeitiger Messung der Torsion und Biegung mittels einer Vierquadrantendiode. Ein integrierter Piezoaktor dient zur Ausregelung hochfrequenter und kleiner Bewegungen. Niederfrequente Bewegungen werden durch die NMM ausgeregelt [DHH+06].

Beim Long-Range Scanning Force Microscope (LR-SFM) der PTB wurde ein zweistufiges Konzept für die Bewegung der Probe umgesetzt. Die Grobbewegung erfolgt in der X,Y,Z-Richtung durch die an der TU Ilmenau entwickelte und mittlerweile von SIOS vertriebene Nanomessmaschine (NMM-1). Die Feinbewegung hoher Dynamik in Z-Richtung erfolgt durch einen auf den Messtisch der NMM-1 aufgesetzten piezoelektrischen Messtisch der Firma Physik Instrumente.

Tabelle 2.4: Messprinzipien zur Positionierung für eine Reproduzierbarkeit von kleiner 50 nm [DKW+06].

Messprinzip		Anzahl der möglichen Achsen	Auflösung	relativer Messbereich	Messbereich	Ergänzungen
kapazitiv		mehrere	$0{,}1\,\mathrm{nm}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$\leq 300\,\mu\mathrm{m}$	Differenzmessung zeigt eine bessere Auflösung als eine Messung gegen Erde; segmentierte Plattenstruktur in der x/y-Ebene
induktiv		eine	einige nm	10^{-4}	einige $100\,\mu\mathrm{m}$	Differentialtransformer
optisch (Intensität)		mehrere	einige nm	10^{-4}	einige $100\,\mu\mathrm{m}$	Lichtintensität ändert sich mit Position
Inkremental-optisch	linear	eine	$1\,\mathrm{nm}$	10^{-8}	$\leq 100\,\mathrm{mm}$	Phasengitter auf Zerodur mit Interferenzlesekopf
	2D	zwei	$10\,\mathrm{nm}$	10^{-7}	$\leq 100\,\mathrm{mm}$ x $100\,\mathrm{mm}$	Phasengitter auf Glas mit Interferenzlesekopf
Kristallgitter		zwei	$0{,}1\,\mathrm{nm}$	10^{-4}	$1\,\mu\mathrm{m}$ x $1\,\mu\mathrm{m}$	Kristallgitter mit STM- oder AFM-Messkopf
Dehnmessstreifen		mehrere	$1\,\mathrm{nm}$	10^{-5}	einige $100\,\mu\mathrm{m} < 1\,\mathrm{mm}$	
Mehrstrahlinterferometer		eine	$0{,}1\,\mathrm{nm}$ $(10\,\mathrm{pm})$	10^{-7}		Fabry-Perot-Interferometer; höchste Führungsqualität gefordert; Operationsmodi: quasi-kontinuierlich o. diskret ($\lambda/2$)-Schritte
Zweistrahlinterferometer	Tripelreflektor	eine	$1\,\mathrm{nm}$	$10^{-}9$	einige m	Homodyn- u. Heterodyn-Interferometer; moderate Führungsqualität gefordert
	Planspiegel	mehrere	$0{,}3\,\mathrm{nm}$	10^{-9}	$\leq 1\,\mathrm{m}$	gute Führungs- und Spiegelqualität erforderlich
	Faser	mehrere	nm	10^{-6}	$< 500\,\mu\mathrm{m}$	Faseranordnung mit integrierten Strahlteiler und Faserende als Referenzspiegel
Röntgeninterferometer		eine	$< 0{,}1\,\mathrm{nm}$	10^{-5}	$< 10\,\mu\mathrm{m}$	extreme Führungsqualität erforderlich; Festkörpergelenk in Si; in Kombination mit einem optischen Interferometer Messbereiche bis mm möglich

Tabelle 2.5: Überblick über realisierte metrologische Rasterkraftmikroskope für großflächige Messungen (Anmerkung: Variablen p,l,h in nm).

Einrichtung, (Projektname)	Instrument		Messunsicherheit			Ergänzungen
	Messbereich $X \times Y \times Z$ in µm	Rückführbarkeit	2(3) D laterale Entfernung in nm	Durchschn. Pitch periodischer Strukturen in nm	Stufenhöhe in nm	
NRC, Canada, (metrological AFM)	40000 x 40000 x 6000	Homodyn-Laserinterferometer	1 (als Designziel)	k.A.	k.A.	noch nicht vollständig charakterisiert
NIST, USA, (Molecular Measuring Machine)	50000 x 50000 x 100	Homodyn-Laserinterferometer	≤ 1 (als Designziel)	50 (k=2)	k.A.	STM, Vakuum
PTB, Deutschland, (Long-Range Scanning Force Microscope)	25000 x 25000 x 5000	Homodyn-Laserinterferometer in 3 Achsen	k.A.	$(0{,}002^2 + (3 \text{ x } (9{,}9 \text{ x } 10^{-5} \text{ x } p^2))^{1/2}$	$(0{,}6^2 + \text{x } (7{,}5 \text{ x } 10^{-5} \text{ x } h)^2)^{1/2}$	Kombination aus SFM, Piezoversteller, NMM
TU Ilmenau, Deutschland, (Nanomessmaschine)	25000 x 25000 x 5000	Homodyn-Laserinterferometer in 3 Achsen	≤ 10	k.A.	k.A.	
UNCC, MIT, USA, (Sub-Atomic-Measuring-Machine)	25000 x 25000 x 100	Laserinterferometer	k.A.	k.A	k.A.	Schwingungsdämpfung durch Ölbad

Die Längenmessung durch die NMM-1 erfolgt interferometrisch, während der Z-Aktor kapazitive Sensoren nutzt. Der Messbereich beträgt $25\,\mathrm{mm} \times 25\,\mathrm{mm} \times 5\,\mathrm{mm}$ [DJP+04, DPD+04b, DPD+05].

Das kanadische Metrologie-Institut, das National Research Council (NRC), entwickelte eine LR-AFM mit starker Ähnlichkeit zur Nanomessmaschine. Die Bewegung des Messtisches wird durch eine Reihe von übereinander liegenden Antrieben mit einer Funktionsteilung zwischen Grob- und Feinbewegung ausgeführt. Die unterste Stufe der Antriebe besteht aus einem kommerziellen XY-Tisch (Steinmeyer KDT 180) und dient zur lateralen Grobpositionierung. Die Grobpositionierung verfügt über einen Bewegungsbereich von $100\,\mathrm{mm} \times 100\,\mathrm{mm}$ bei einer Encoder-Auflösung von $100\,\mathrm{nm}$. Darüber folgen drei kommerzielle Z-Aktoren (Physik Instrumente M111.1DG) zur vertikalen Grobpositionierung. Ihr Bewegungsbereich beträgt $15\,\mathrm{mm}$ bei einer minimalen Schrittweite von $50\,\mathrm{nm}$ mit einer Encoder-Auflösung von $7\,\mathrm{nm}$. Auf den drei Z-Aktoren ist ein Messtisch zur Feinpositionierung montiert. Der Messtisch besteht aus einer Festkörperführung (Physik Instrumente P-734) mit einem Bewegungsbereich von $100\,\mu\mathrm{m} \times 100\,\mu\mathrm{m}$. In einem geschlossenen Regelkreis wird mit Hilfe von kapazitiven Sensoren eine Positionsauflösung von $0{,}3\,\mathrm{nm}$ erreicht. Die Feinbewegung in der Z-Richtung wird durch den AFM-Messkopf ausgeführt, dies geschieht durch eine Festkörperführung (Physik Instrumente P-753.11) mit einem Bewegungsbereich von

$12\,\mu\mathrm{m}$ und einer Auflösung von $0{,}05\,\mathrm{nm}$ im geschlossenen Regelkreis. Zur Längenmessung werden Homodyn-Laserinterferometer (SIOS SP 2000) genutzt. Rotationsbewegungen werden mit Hilfe von Autokollimationsfernrohren bestimmt. Das System wurde bisher noch nicht vollständig charakterisiert [Eve09].

2.4 Koordinatenmessgeräte und takile Mikrotaster in der Nanometrologie

Neben metrologischen Rasterkraftmikroskopen finden in der Nanometrologie ebenfalls miniaturisierte Koordinatenmessgeräte und Mikrotaster Anwendung. Einen Überblick über vorhandene Geräte in Wissenschaft und Wirtschaft bietet Tabelle 2.6. Sie stellen keine Konkurrenz oder Parallelentwicklung zur Rastersondenmikroskopie dar, sondern vielmehr eine Ergänzung. Der Übergang zwischen LR-AFMs und Koordinatenmessmaschinen ist teilweise fließend und wie bei der NMM-1 der TU Ilmenau durch einen Sensortausch möglich. Besonders bei Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen oder bei „echten“ 3D-Messungen sind hochgenaue Koordinatenmessgeräte Rasterkraftmikroskopen überlegen beziehungsweise machen Messungen erst möglich. Sie bedienen neben den Erfordernissen der Nanometrologie auch den mesoskaligen Messbereich. Auch an dieser Stelle wird speziell für ältere Entwicklungen, wie die „High-Precision 3D-Coordinate Measuring Machine“ [VRS98, Ver99] der TU Eindhoven, die Long-Rang Scanning Stage (LORS) [HHT00], die Small-CMM [LHJ+01] und die Nano-CMM der Universität Tokyo [FTO03], auf die Literatur verwiesen. Die sogenannte „Ultra Precision CMM“ der TU Eindhoven [Rui01, RFE01, RE03] wurde kommerzialisiert. Sie wird innerhalb der ISARA-Reihe weiterentwickelt [Seg07].

Das schweizer Bundesamt für Metrologie (METAS) entwickelte eine 3D Koordinatenmessmaschine mit einem Messbereich von $90\,\mathrm{mm} \times 90\,\mathrm{mm} \times 38\,\mathrm{mm}$ bei einer Einzelpunktwiederholbarkeit von $5\,\mathrm{nm}$. Es handelt sich um eine Kombination aus einem hochpräzisen, kommerziellen Messtisch, entwickelt von Philips CFT, und einem selbstentwickelten Mikrotaster. Als Konstruktionswerkstoff wurde Aluminium verwendet. Die abbé-fehlerfreie Längenmessung sowie der Antrieb erfolgen ähnlich dem Aufbauprinzip der NMM mit drei Laserinterferometern und einer Messspiegelecke beziehungsweise durch Tauchspulenantriebe. Die Führung erfolgt verlustleistungsarm über Luftlager [KMT07].

Die University von North Carolina Charlotte und das Massachusetts Institute of Technology entwickelten die Konzepte der Long range scanning stage [HHT00] und der Short-Travel Angstrom Stage durch die Sub-Atomic Measuring Machine weiter. Der Messbereich beträgt $25\,\mathrm{mm} \times 25\,\mathrm{mm} \times 0{,}1\,\mathrm{mm}$. Zur Dämpfung und Vibrationsreduktion schwimmt der Messtisch in einem Ölbad. Der Messtisch wird durch vier Zweiwege-Linearmotoren magnetschwebend in

Position gehalten. Die laterale Längenmessung erfolgt durch Laserinterferometer. Die vertikale Längenmessung erfolgt durch kapazitive Sensoren [HTW01].

Die TU Eindhoven (TUE) entwickelte die sogenannte „NanoCMM“ mit einem Messbereich von $50\,\mathrm{mm} \times 50\,\mathrm{mm} \times 4\,\mathrm{mm}$ und einer Messunsicherheit (3D, $k = 2$) von $25\,\mathrm{nm}$. Als Konstruktionswerkstoff wurde Aluminium verwendet. Antrieb sowie Lagerung in der lateralen Ebene erfolgen durch Tauchspulen beziehungsweise Luftlager. In der Z-Richtung ist das System elastisch geführt und gewichtskraftkompensiert. Beim Entwurf wurde speziell auf eine Minimierung der bewegten Massen geachtet, um eine hohe Dynamik erreichen zu können. Die Längenmessung erfolgt über optische Linearencoder mit einer Auflösung von einem Nanometer. Durch eine spezielle Anordnung der Achsen ist das Gerät frei von Abbéfehlern in der horizontalen Ebene [SRS+04, Seg07].

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 622 der TU Ilmenau wird an einer Weiterentwicklung der NMM unter dem Namen NPMM 200 gearbeitet. Die angestrebte Auflösung der Interferometer beträgt $0{,}08\,\mathrm{nm}$. Das Ziel ist es eine Messunsicherheit (3D) von kleiner $30\,\mathrm{nm}$, sowie eine Positionierreproduzierbarkeit von $1\,\mathrm{nm}$ bei einem Messbereich von $200 \times 200 \times 25\,\mathrm{mm}^3$ zu erreichen.

Unter den kommerziellen Koordinatenmessmaschinen gibt es ein neues Messkonzept. Die Firma MYCRONA-Gesellschaft für innovative Messtechnik mbH stellt die Altera Nano vor. Die Altera Nano nutzt eine Portalführung für die X-Bewegung. Die Y-Bewegung erfolgt durch einen Messtisch auf Basis einer Schwalbenschwanzführung. Es gibt zwei unabhängige Z-Achsen. Z1 ist mit einem optischen Sensor mit Beleuchtung und einem optimalen Weißlicht-Sensor ausgestattet. Z2 ist mit einem WhitePoint-Mikrotaster ausgestattet. Der optische Sensor ist eine Festoptik mit Wechselobjektiven. Der optimale Weißlicht-Sensor (WLS) kann zu 3D-Scanning-Messungen oder Einzelpunktantastungen in Z-Richtung eingesetzt werden. Der Messbereich ist durch verschiedene Messköpfe gegeben ($10\,\mathrm{mm}$, $3\,\mathrm{mm}$, $600\,\mu\mathrm{m}$, $300\,\mu\mathrm{m}$). Die Messauflösung beträgt $10\,\mathrm{nm}$.

Nach einem Überblick über die Entwicklung der Positioniertechnik soll nun der Stand der Technik im Bereich der Mikrotaster kurz vorgestellt werden (tabellarischer Überblick - siehe Tabelle 2.7). Ältere Entwicklungen im Bereich der Mikrotaster wie die NPL microprobe [PLO99] sind in der Literatur zu finden.

Die PTB hat einen opto-taktilen Mikrotaster entwickelt, der über die Firma Werth kommerziell erhältlich ist. Das Funktionsprinzip basiert auf einer optischen Detektion der Tastkugel. Dabei besteht der Schaft aus einer Glasfaser an deren Ende die Tastkugel befestigt ist. Die Beleuchtung geschieht durch die Glasfaser. Die Messung der Bewegung in Z-Richtung erfolgt durch eine weitere Kugel am Schaft des Tasters und eine zweite CCD-Camera. Der kleinste kommerziell erhältliche Tastkugeldurchmesser beträgt $25\,\mu\mathrm{m}$ [WEPM04, WPH06, Rau06].

Tabelle 2.6: Überblick über vorhandene sowie kommerziell erhältliche Koordinatenmessgeräte für Mikrosysteme [Seg07].

Hersteller	Produktname	Messbereich X x Y x Z in mm	Auflösung in nm	Unsicherheit in nm
kommerzielle Koordinatenmessgeräte				
Carl Zeiss	F25	$140 \times 140 \times 100$	7,5	250
IBS	ISARA 400	$400 \times 400 \times 100$	k.A	45 (1D)/100 (3D)
Mitutoyo	Nanocoord measuring machine [HCHDC06]	$300 \times 200 \times 100$	k.A.	200
Mycrona	Altera nano	$400 \times 400 \times 220\,[Z1] \times 100\,[Z2]$	k.A.	$\pm\left(0{,}53 + \frac{L}{400}\right)\,\mu\mathrm{m}$ (1D) $\pm\left(0{,}79 + \frac{L}{400}\right)\,\mu\mathrm{m}$ (lateral) $\pm\left(1{,}18 + \frac{L}{300}\right)\,\mu\mathrm{m}$ (3D)
Panasonic	UA3P-6	$400 \times 400 \times 90$	k.A.	200
SOIS	NMM-1	$25 \times 25 \times 5$	0,1	< 10
TU Eindhoven	NanoCMM	$50 \times 50 \times 4$	1	25
universitäre Entwicklungen u. Prototypen				
METAS	Ultraprecision micro-CMM	$90 \times 90 \times 38$	k.A.	50 (mit 3D touch probe)
TU Ilmenau	NPMM 200	$200 \times 200 \times 25$	0,08 (Zielsetzung)	k.A.
UNCC, MIT	SAMM	$25 \times 25 \times 0{,}1$	k.A.	k.A.

Die TU Braunschweig und die PTB entwickelten einen Mikrotaster, der auf einer Silizium-Boss-Membran mit piezoresistiven Widerständen basiert. Mittlerweile wird eine kommerzielle Version von Carl Zeiss IMT vertrieben. Der Taststift hat eine Länge von $5\,\mathrm{mm}$ und einen Durchmesser von $1\,\mathrm{mm}$ beziehungsweise $0{,}2\,\mathrm{mm}$, am freien Ende. Die Tastkugel hat einen Durchmesser von $300\,\mu\mathrm{m}$. Zur Befestigung ist der Taststift auf der Vorderseite mit Epoxidharz aufgeklebt. Die Kraft- beziehungsweise Verformungsmessung der Membran erfolgt mittels der piezoresistiven Widerstände über Wheatstonesche Messbrücken auf der Rückseite der Membran [BCH+01, BBB+06]. Die PTB hat das Verhalten dieses Mikrotasters in Kombination mit der NMM-1 untersucht [DBPD09]. Der kommerziell erhältliche Mikrotaster Gannen XP von der Firma XPRESS basiert auf einem ähnlichen Funktionsprinzip wie die Entwicklung der TU Braunschweig, einem Siliziumchip mit piezoresistiven Elementen.

Die TU Eindhoven (TUE) hat einen Mikrotaster entwickelt, der auf optischer Triangulation basiert. Drei Laserdioden erzeugen Laserstrahlen, welche von an der Probenhalterung befestigten Spiegeln reflektiert werden. Drei positionsempfindliche Dioden (PSD) liefern jeweils zwei Koor-

dinaten in einem System mit 6 Freiheitsgraden. Aufgrund der Nichtlinearität der PSD beträgt die Unsicherheit des Systems $0{,}5\,\mu\mathrm{m}$. Der Taststift wird bei diesem System durch Festkörpergelenke geführt. Es existieren ebenfalls Versionen mit piezoresistiver Kraftmessung. Die TUE Mikrotaster und die NPL microprobe sind als Antastsysteme für die ISARA kommerziell verfügbar [WEPM04, WPH06].

METAS und Mecartex entwickelten einen Mikrotaster, der aus drei Parallelkinematiken besteht, die um 45 Grad geneigt sind. Auf diese Art und Weise erlaubt der Mechanismus nur Bewegungen in genau drei Freiheitsgraden, welche mit Hilfe von induktiven Sensoren gemessen werden. Die magnetische Halterung des Tastelements macht einen einfachen Austausch möglich. Die Antastkraft und die Wirkung der Schwerkraft sind in allen Achsen gleich [KMT07, MFB+03, MBT+03].

Bei der kommerzieller Entwicklung, Triskelion, von IBS Precision Engineering handelt es sich um einen Mikrotaster mit kapazitiven Sensoren. Der Taster befindet sich auf einem Starrkörper, welcher durch Festkörpergelenke in Form eines dreibeinigen Körpers elastisch aufgehängt ist. Auf dem Starrkörper befinden sich ebenfalls drei runde Scheiben als Messkörper für die kapazitiven Sensoren. Das Design ähnelt dem Mikrotaster vom NPL.

Zusammenfassend kristallisieren sich zwei Aufbauprinzipien heraus. Die Mikrotaster von NPL, IBS und TU Eindhoven basieren auf Festkörpergelenken mit piezoresistiven oder kapazitiven Sensoren. Die Mikrotaster von EXPRESS und der TU Braunschweig basieren auf Siliziummembranen mit piezoresistiven Sensoren. Der Mikrotaster von METAS bildet mit seinen geneigten Achsen und der induktiven Längenmessung eine Ausnahme. Eine weitere Ausnahme ist der opto-takile Taster von PTB/Werth.

Tabelle 2.7: Antastsysteme für Mikrosysteme.

	Steifigkeit in $\mathrm{N/m}$ (horiz./vert.)	Messbereich in $\mu\mathrm{m}$ (horiz./vert.)	eingeforderte Wiederholbarkeit in nm	Messunsicherheit in nm
IBS Triskelion	70	± 10	k.A.	< 15
NPL microprobe	10	10	10(x,y) / 50(z)	50
METAS 3D touch probe	20	20	5	k.A.
PTB 3D-MME	2600 / 107000	44 / 100	10 / 20	k.A.
TU Eindhoven Microprobe	160 / 800	100	k.A.	k.A.
XPRESS Gannen XP	400	30	2	45

2.5 Einordnung der Nanometer-Koordinaten-Messmaschine

Die Nanometer-Koordinaten-Messmaschine (NCMM) besteht aus einem Nanopositioniertisch, der NMM-1 (siehe Abschnitt 2.3), und einem modifizierten, kommerziellen AFM, dem Ultraobjective von der Firma Surface Imaging Systems (mittlerweile Bruker Nano GmbH). Der vorgestellte Messaufbau wurde im Rahmen der vorherigen Arbeiten in der Professur für Mess- und Informationstechnik aufgebaut [Pet03] und modifiziert [Gru09].

Das SIS Ultraobjective [Sur06] wurde für Anwendungen in Kombination mit optischen Mikroskopen entwickelt. Die unmodifizierte Version hat die Dimensionen eines Standardmikroskopobjektivs und kann in Kombination mit anderen Objektiven an einem Mikroskoprevolver betrieben werden. Dies dient vor allem einer Groborientierung auf der Probenoberfläche. Eine Feinpositionierung ist trotz einer Kalibrierung aufgrund des Spiels gängiger Mikroskoprevolver nicht möglich. Der AFM-Messkopf wurde entsprechend der Aufbauprinzipien für MAFMs modifiziert. Im Gegensatz zu vielen anderen AFMs wird bei diesem System als Aktuator kein Piezoröhrenscanner, sondern ein Piezostapel verwendet. Die Bewegung ist somit auf die Z-Richtung beschränkt. Die Verwendung eines Piezostapelaktors wirkt sich durch eine höhere Steifigkeit und eine höhere Dynamik (Bandbreite) positiv auf die metrologischen Eigenschaften des Gesamtsystems aus. Bei dem Piezostapel handelt es sich um einen PI 841.10 von der Firma Physikinstrumente [Phy08] mit einem Bewegungsbereich von $15\,\mu\mathrm{m}$. Die Auslenkung des Piezoaktors wird durch einen eingebauten Dehnmesstreifen gemessen, welcher die Topologie-Messdaten generiert. Das AFM ist in der Lage im Kontakt- und im Nichtkontaktmodus zu messen. Die Messung der Biegungs- beziehungsweise der Schwingungsamplitude des Cantilevers erfolgt durch ein Fabry-Pérot-Interferometer. Die Verfolgung der Oberflächentopologie geschieht mittels eines digitalen PI-Reglers mit einer Abtastrate von $30\,\mathrm{kHz}$. Aufgrund der Bauraumbeschränkungen war der Einsatz eines Objektivrevolvers bei der NCMM nicht möglich. Aus diesem Grund wurde der AFM-Messkopf durch eine Endoskopoptik zur Beobachtung der Probenoberfläche ergänzt. Zur Schwingungsisolation ist die NCMM auf einem schwingungsisolierten Tisch der Firma Integrated Dynamics Engineering [Int] aufgestellt. Zur Minimierung akustischer Störungen wird das Gesamtsystem der NCMM durch eine selbstgefertigte Schallschutzhaube abgeschirmt.

Eine Einordnung der NCMM kann auf Basis der VDI/VDE-Richtlinie 2656 erfolgen. Die VDI/VDE-Richtlinie 2656 unterscheidet zwischen drei grundsätzlichen messtechnischen Kategorien von Rasterkraftmikroskopen:

- Kategorie A: Referenzgeräte mit integrierten Laserinterferometern (Rückführbarkeit über Laserwellenlänge gegeben)

- Kategorie B: Rastersondenmikroskopie mit integriertem Wegaufnehmer, beispielsweise Dehnmesstreifen, kapazitive oder induktive Wegaufnehmer / Die Kalibrierung erfolgt über

Abbildung 2.9: NCMM - Messaufbau zu Beginn dieser Arbeit.

Normale oder Laserinterferometer. (Betrieb im geschlossenen Regelkreis: B1 / Betrieb im offenen Regelkreis: B2)

- Kategorie C: Rasterkraftmikroskope ohne Positionssensor / Die Wegmessung erfolgt allein auf Basis der an den Stellelementen angelegten elektrischen Spannung.

Die NCMM kann nicht als Ganzes einer bestimmten Kategorie zugeordnet werden. In den lateralen Messachsen erfolgt die Messung interferometrisch und kann somit der Kategorie A zugeordnet werden. Der Wegaufnehmer der Z-Achse des Rasterkraftmikroskops besteht aus einem integrierten Dehnmessstreifen. Das Rasterkraftmikroskop kann somit der Kategorie B zugeordnet werden. Da das Rasterkraftmikroskop im geschlossenen Regelkreis misst, wird es der Unterkategorie B1 zugeordnet. Im Vergleich zu den realisierten metrologischen Rasterkraftmikroskopen und Rasterkraftmikroskopen für großflächigen Messungen (siehe Abschnitt 2.3) ist die NCMM mit ihren metrologischen Eigenschaften in die Weltklasse einzuordnen. Allerdings ist die Längenmessung auf Basis eines Dehnmessstreifen nicht mehr Stand der Technik. Kapazitive Wegaufnehmer haben eine um den Faktor 10 niedrigere Auflösung (siehe Tabelle 2.4).

2.6 Mess- und Auswertestrategien in der Nanometrologie

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Rasterkraftmikroskope zeigen sich verschiedene Entwicklungstendenzen. Neben der Weiterentwicklung einer bereits vorhandenen Multisensorik gilt es ebenfalls Navigationsstrategien für große Messräume zu entwickeln. Eine Verringerung der Messzeiten wird durch eine Parallelisierung des Messprinzips erwartet. Echte 3D-Messungen und Nicht-Raster-Messstrategien bedürfen noch intensiver Forschung.

Multisensorik. Die Kombination von Rasterkraftmikroskopen mit anderen Antastsensoren ist durch die Zusammenführung der Stärken verschiedener Messsysteme meist der Summe der Teile überlegen. Die einfachste Art der Multisensorik ist die Messung mit verschiedenen Instrumenten.

Problematisch bei dieser Vorgehensweise ist der Verlust des einheitlichen Koordinatensystems. Durch Marker oder markante Strukturen können die Bezüge zwischen den Messdaten der unterschiedlichen Instrumente zurückgewonnen werden. Dieses Problem stellt sich nicht bei Integration verschiedener Sensoren in ein einziges Messsystem mit einem gemeinsamen Koordinatensystem. Aufgrund des beschränkten Bauraums werden die Sensoren oft nebeneinander in Brückenbauweise angeordnet und die Probe durch ein Positioniersystem zwischen den Sensoren bewegt. Dabei muss das Positioniersystem in seinem Bewegungsbereich um den maximalen Abstand zwischen den Sensoren vergrößert werden, um den Messbereich der Sensoren nicht einzuschränken. In Hinblick auf diese Arbeit ist besonders die Kombination von einem AFM-Sensor mit einem optischen Mikroskop von Interesse. Der Vorteil einer solchen Kombination erwächst aus der Möglichkeit auf Basis der Mikroskopoptik eine Region of Interest (ROI) schnell identifizieren zu können, um sie nachfolgend mit dem AFM lokal zu messen [DDX+09]. Besonders interessant ist die Verwendung von interferometrischen Methoden um mit Hilfe des Mikroskops quantitative Informationen gewinnen zu können [TDSKSD04, MSD+09]. In diesem Zusammenhang finden ebenfalls konfokale beziehungsweise chromatisch-konfokale Mikroskope ihre Anwendung [Fri05a, Fri05b, Fri06, MKF04]. Kommerziell sind verschiedene SFMs auf dem Markt, die zusammen mit Standardmikroskopobjektiven in einem Mikroskoprevolver betrieben werden können.

Navigation. Die Navigation in großen Messräumen stellt auch bei der Verwendung von optischen Navigationssensoren ein Problem dar. Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 622 werden optische Navigationsstrategien untersucht. *Rosenberger* stellt in [Ros08] ein duales optisches Sensorssystem vor. Es besteht aus zwei optischen Sensoren mit stark verschiedenen Abbildungsoptiken in Kombination mit einem 3D-Mikrotaster. Dabei dienen die optischen Sensoren, ein Grobnavigationssensor und ein Feinnavigationssensor, der Navigation und Positionierung des Mikrotasters. *Töpfer* stellt ein theoretisches Modell für adaptive, intelligente Bildsensoren vor [Töp08]. Diese Sensoren passen sich selbsttätig an die Messbedingungen an. Es wurden spezielle Algorithmen für Anpassung der Beleuchtung, der Fokussierung und der Kantenortbestimmung vorgestellt. Durch die Ablösung subjektiver Einstellregeln durch eine bedienerunabhängige, automatisierte Antastung konnte die Antastunsicherheit verringert werden. *Machleidt et al.* adaptierten Methoden der Auswertung von Satellitenbildern um Messdaten eines Weißlichtinterferometers zu speichern und zu analysieren [MSD+09]. Dabei werden Koordinaten- und Bilddaten gemeinsam im GEOtiff-Format abgespeichert. Methoden zur automatischen Segmentierung und Markierung von Satellitenbildern werden für die Auswertung der Messdaten genutzt.

Parallelisierung. Eine große Schwäche der Rastersondenmikroskope ist das serielle Messprinzip. In der laufenden Grundlagenforschung werden zur Zeit Cantilever-Arrays entwickelt, um diese Schwäche zu beseitigen. Stand der Technik sind selbstoszillierende, piezoresistive Cantilever-Arrays [MYM+98]. Ein weit bekanntes 2D Cantilever Array ist das Millipede-System, welches von IBM Research zum Zweck der Datenspeicherung entwickelt wurde [LDD+00]. Im Rahmen

des EU-Projekts PRONANO[1] entwickelt die TU Ilmenau Cantilever-Arrays mit selbstozillierenden, selbst-akturierenden und piezoresistiven Cantilevern [RIV+06]. Die Cantilever werden über ihre integrierten, direkt-oszillierenden, thermischen Bimorphaktoren zur Schwingung angeregt. Mit Hilfe des piezoresistiven Messprinzips wird die Phasenverschiebung zwischen Anregungsfrequenz und Schwingungsantwort des Cantilevers durch die Interaktion mit der Messoberfläche gemesssen. Zur Regelung wird ein PI-Regler verwendet [Ran05].

3D-Messung. Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen und echte 3D Messungen sind für Rasterkraftmikroskope problematisch. Die Messung von Seitenwänden und tiefen Gräben spielt besonders in der Halbleiterindustrie eine große Rolle. Aus diesem Grund werden Kohlenstoffnanoröhren als Sonden eingesetzt. Kohlenstoffnanoröhren sind aufgrund ihrer chemischen Strukturen hoch definiert und reproduzierbar. Für Messungen an Seitenwänden und überhängenden Strukuren wurden Cantilever mit überstehenden oder aufgeweiteten Enden entwickelt. Diese Messspitzen werden in speziellen AFMs mit einer Aktorik in Z- und X/Y-Richtung verwendet [MW94]. Leider ist die Auflösung der Messungen von Seitenwänden durch den relativ großen Radius der modifizierten Enden begrenzt [DOO+05, OD07]. Es zeigt sich, dass die 3D-Fähigkeiten von AFMs immer noch sehr begrenzt sind.

Nicht-Raster-Messstrategien. Konventionelle Rasterkraftmikroskope rastern die Messoberfläche in rechteckigen Fenstern durch parallele, äquidistante Linienscans ab. Diese Messstrategie ist im Zusammenhang mit dem seriellen Messprinzip und der Notwendigkeit, immer den kompletten Messbereich zu messen, langsam. *Koops et al.* zeigten [KD03] die Überlegenheit einer vektorbasierten Messstrategie. Die Verwendung dieser vektor-basierten Messstrategie ist besonders sinnvoll, wenn Vorwissen über die Messoberfläche verfügbar ist. Es wird nicht mehr der gesamte Messbereich gemessen, sondern nur die für die Erfüllung der Messaufgabe wichtigen Geometrieelemente. Diese Vorgehenweise ist der Messstrategie von makroskopischen Koordinatenmessmaschinen sehr ähnlich. Vorteile dieser Messstrategie sind die erhöhte Messgeschwindigkeit, die Verringerung der Messdatenvolumina und die Verringerung der Messunsicherheit. Als problematisch erweisen sich das Erfordernis einer exakten Positionierung der Messelemente und die Notwendigkeit einer genauen Charaktierisierung der Messspitze. Einen inspirierenden, interdisziplinären Überblick über Nicht-Raster-Messstrategien im Hinblick auf eine Übertragbarkeit auf die Rastersondenmikroskopie bieten *Andersson et al.* [AA07]. Eine weitere Nicht-Raster-Messstrategie ist die Verfolgung von fadenförmigen Messobjekten, beispielsweise eines DNS-Strangs, durch eine Serie von nicht-parallelen Linienmesssungen mit gleichzeitiger Approximation der Objekttrajektorie [AJ05, And07, And08, CA08, CA09b, CA09a]. Es wurde auch die Verfolgung von Messobjekten anhand von Oberflächeneigenschaften wie Rauheit und Elastizität demonstriert [CFK+07, FCA+07, FCK+07].

[1] http://www.pronano.org/

Methoden der digitalen Bildverarbeitung. In Kombination mit Multisensorik ist die Anwendung von Prinzipien der digitalen Bildverarbeitung (DBV) in der Nanometrologie sinnvoll. Es konnten bereits erfolgreich Methoden der DBV auf Probleme der Nanometrologie übertragen werden. Zur Bestimmung des Drifts von Rasterkraftmikroskopen wurden Phasenkorrelationsmethoden genutzt [ZYL+07, YJB05, YJB08]. Es wurden Methoden der Bildregistrierung zur Datenfusion und zum Stitching einsetzt. Im Bereich der Datenfusion wurden die gleiche Probenoberfläche mit zwei unterschiedlichen AFM-Modi gemessen. Auf Basis von Kreuzkorrelation und der Methode der kleinsten Quadrate wurde die Transformation zwischen beiden Datensätzen ermittelt [FCK+06]. Ebenso wurde eine Methode zum Zusammenfügen von Datensätzen zu Übersichtskarten, basierend auf der Kreuzkorrelation, entwickelt [MBDCH07].

2.7 Methoden der digitalen Bildverarbeitung

Im Rahmen der Automatisierung von AFM-Messungen durch den Einsatz von Vorwissen (siehe Kapitel 4) werden in dieser Arbeit Methoden der digitalen Bildverarbeitung verwendet. Speziell finden die Methoden der Segmentierung, Clusterung, Bildregistierung und Kantenerkennung Anwendung.

2.7.1 Segmentierung

Unter dem Begriff Segmentierung versteht man den Prozess der Unterteilung eines Bildes in sich nicht überlappende Regionen auf die Weise, dass jede Region homogen aber die Vereinigung zweier angrenzender Regionen nicht homogen ist [PP93]. Das Gebiet der Segmentierung ist sehr umfangreich. Daher erhebt diese Arbeit nicht den Anspruch einer vollständigen Darstellung. Es werden vielmehr die für die weitere Arbeit relevanten Aspekte der Segmentierung angeführt. Für einen Überblick vorhandener Algorithmen wird an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen [PP93, GWE04]. Folgende Klassen von Segmentierungsalgorithmen werden in dieser Arbeit verwendet:

1. Segmentierung mittels Kantenerkennung
2. Wasserscheidentransformation
3. Level Set-Methoden

Segmentierung mittels Kantenerkennung. Bei der Segmentierung durch Kantenerkennung werden Bildobjekte auf Basis ihrer Kontur beziehungsweise Umrandung detektiert. Eine Kante ist durch eine schnelle, räumliche Änderung der Intensitätswerte des Bildes gekennzeichnet und kann somit über die erste und zweite Ableitung der Intensitätswerte in Kombination mit Schwellwertoperationen erkannt werden. Die meisten Kantendetektionsverfahren werden effizient als Filterkerne in Kombination mit einer Faltung implementiert. Diese Filterkerne werden auch als Kantenoperatoren bezeichnet. Bekannte Kantenoperatoren sind beispielsweise der Sobel-, der

Prewitt-, der Roberts- und der Canny-Operator. Nach der Erkennung der Kanten sind diese meist lückenhaft und ergeben keine geschlossene Kontur. Um eine geschlossene Kontur zu erhalten werden die Kanten meist mit einer morphologischen Bildoperation, dem sogenannten „Closing“, geschlossen. Die Bildobjekte können durch eine Fülloperation der geschlossenen Konturen extrahiert werden [GWE04].

Wasserscheidentransformation. Ein weiterer gebräuchlicher Ansatz zur Segmentierung basiert auf der sogenannten Wasserscheidentransformation. Der Begriff der Wasserscheide wurde aus der Geographie übernommen und steht für einen Bergrücken, der die Einzugsgebiete verschiedener Flusssysteme trennt. Ein Einzugsgebiet oder Sammelbecken ist ein Gebiet, welches gesammeltes Regenwasser in einen Fluss leitet. Bei der Wasserscheidentransformation werden die Intensitätswerte eines Bildes als Höhenwerte interpretiert. Für die Bildsegmentierung muss das Segmentierungsproblem so beschrieben sein, dass die durch die Wasserscheidentransformation gewonnenen „Bergrücken“ und „Sammelbecken“ den gesuchten zu segmentierenden Objekten und Regionen entsprechen [GWE04, VS91].

Aktive Konturmodelle.
Das Grundprinzip der aktiven Konturen, auch unter dem englischen Begriff „Snakes“ bekannt, wurde 1987 durch *Kass, Witkin und Terzopoulos* [KWT87] vorgestellt. Dabei bewegt sich die aktive Kontur, ausgehend von einer gegebenen Startkontur, auf Basis der durch die Bildinformation erzeugten Kräfte auf die Grenzen der zu segmentierenden Objekte zu. Es wirken zwei verschiedene Arten von Kräften auf die Kontur. Die internen Kräfte werden durch die Beschreibung der Kontur aus ihrer Form heraus erzeugt. Externe Kräfte werden durch die Bildinformation erzeugt. Die Vorteile gegenüber klassischen Segmentierungsverfahren, wie Segmentierung durch Kantenerkennung oder Wasserscheidentransformation, sind die Möglichkeit einer subpixelgenauen Bestimmung der Objektgrenzen sowie die Fähigkeit zur Erzeugung von glatten und geschlossenen Kurven [LKGD08]. Es gibt zwei Kategorien von aktiven Konturmodellen: kantenbasierte und regionenbasierte. Kantenbasierte Modelle nutzen lokale Kanteninformationen um die aktive Kontur den Objektgrenzen anzunähern. Regionenbasierte Modelle versuchen eine „Region of Interest“ (ROI) durch bestimmte regionale Deskriptoren zu identifizieren, um die Bewegung der Kontur zu führen [LKGD08]. Aktive Konturen werden in dieser Arbeit speziell für die Segmentierung von Nanoporen (siehe Abschnitt 6.4) verwendet, da sie auch mit verrauschten Bildern und Intensitätsinhomogenitäten gute Resultate zeigen.

2.7.2 Bildregistrierung

Die Bildregistrierung ist eine fundamentale Aufgabe der digitalen Bildverarbeitung. Bei der Bildregistrierung handelt es sich um den Prozess der Ausrichtung beziehungsweise Überlappung zweier oder mehrerer Bilder der gleichen Szene, welche zu unterschiedlichen Zeiten, in unterschiedlichen Bildwinkeln und/oder durch unterschiedliche Sensoren gemacht wurden [ZF03]. Zur Lösung

dieser Aufgabe ist es notwendig eine Transformationsfunktion zu finden, welche jeden Punkt des gemessenen Bildes zu einem Punkt des Referenzbildes eindeutig zuordnet [GB92]. Aufgrund der Weite der Thematik der Bildregistrierung kann hier nur ein grober Überblick gegeben werden. Ziel ist es eine Basis für die Einordnung der in Kapitel 4 verwendeten Algorithmen zu schaffen und speziell in die Thematik der Registrierung von Mikroskopbildern einzuleiten. Einen umfassenden Überblick über die Thematik der Bildregistrierung geben [GB92, ZF03]. Der Ablauf der meisten Bildregistrierungsalgorithmen kann laut *Zitová et al.* in vier Schritte unterteilt werden:

1. **Merkmalsdetektion:** Im ersten Schritt werden hervorstechende und ausgeprägte Objekte (geschlossene Flächen, Kanten, Konturen, Ecken usw.) manuell oder vorzugsweise automatisch detektiert. Für die weitere Verarbeitung können diese Objekte durch eine punktförmige Repräsentation ihrer Selbst, sogenannte Kontrollpunkte, dargestellt werden.

2. **Merkmalsabgleich:** Im zweiten Schritt wird eine eindeutige Zuordnung zwischen den Merkmalen des gemessenen Bildes und den Merkmalen des Referenzbildes erstellt.

3. **Bestimmung des Transformationsmodells:** Der Typ und die Parameter der Projektionsfunktion, welche die Transformation zwischen gemessenem Bild und Referenzbild realisiert, werden bestimmt.

4. **Resampling und Transformation des Bildes:** Das gemessene Bild wird unter Verwendung der Projektionsfunktion transformiert und gegebenenfalls im Raster des neuen Koordinatensystems interpoliert. Dieser Schritt ist bei der Registrierung von Markern nur im Rahmen der Überprüfung des Registrierungsalgorithmus von Bedeutung.

Flächenbasierte Algorithmen: Bei den flächenbasierten Algorithmen, welche oft auch als korrelationsähnliche Methoden oder Mustererkennung bezeichnet werden, verschmilzt der erste Schritt der Bildregistrierung, die Merkmalsdetektion, mit dem zweiten Schritt, dem Merkmalsabgleich [GB92]. Vorteilhaft ist die einfache Implementierung dieser Algorithmen. Da für den Merkmalsabgleich die gesamte Information eines Fensters oder eines Bildes verwendet wird, weisen die Methoden eine hohe rechentechnische Komplexität auf. Ebenso sind die Algorithmen durch die Wahl der Fensterform (rund, rechteckig usw.) auf bestimmte Transformationstypen beschränkt. Ein weiterer Nachteil ist die geringe Robustheit gegenüber Intensitätsänderungen durch Rauschen, eine veränderte Beleuchtung und/oder die Verwendung unterschiedlicher Sensortypen [ZF03]. Eine der gebräuchlichsten und am häufigsten verwendeten flächenbasierten Registrierungsmethoden ist die Kreuzkorrelation [GB92, Lew95]. Für ein Muster $T\,(x,y)$ und ein Bild $I\,(x,y)$ ist eine zweidimensionale, normalisierte Kreuzkorrelation wie folgt definiert:

$$C\,(x,y) = \frac{\sum_x \sum_y \left(T\,(x,y) - \mu_T\right)\left(I\,(x-u,y-v) - \mu_I\right)}{\sqrt{\sum_x \sum_y \left(I\,(x-u,y-v) - \mu_I\right)^2 \sum_x \sum_y \left(T\,(x-u,y-v) - \mu_T\right)^2}}$$

Bei der Kreuzkorrelation gehen alle Bildpunkte beider zu registrierender Bilder in den Merkmalsraum ein. Als Ähnlichkeitsmaß wird die Korrelation der Bildpunkte untereinander genutzt. Zur

Identifikation des Korrelationspeaks wird der gesamte Suchraum linear durchsucht. Mit Hilfe der Fast Fourier Transformation (FFT) kann diese Methode effizient implementiert werden, was bereits zu einer breiten praktischen Anwendung der Methode führte. Obwohl die Auswertung im Frequenzraum schneller ist als eine Auswertung im Ortsraum, steigt der Speicherbedarf mit dem Logarithmus der Bildfläche. Des Weiteren steigt der Rechnenaufwand beider Korrelationsalgorithmen linear mit der Bildfläche oder schneller [GB92]. Auf Basis einer 2D-DFT kann ein durch eine Kreuzkorrelation gewonnener pixelgenauer Korrelationspeak verfeinert werden [GSTF08]. Durch den Einsatz von sogenannten Fourier-Methoden kann die Zeitkomplexität gegenüber korrelationsähnlichen Methoden verbessert werden. Die Fourier-Methoden sind auch robuster gegenüber sich verändernden Bedingungen und frequenzabhängigem Rauschen. Eine weit verbreitete Fourier-Methode ist die sogenannte Phasenkorrelation. Die Phasenkorrelation wird mit Hilfe des Fourier Verschiebungssatzes über die inverse Fouriertransformation der Kreuzleistungsdichte berechnet:

$$\frac{\mathfrak{F}(f)\,\mathfrak{F}(g)^*}{|\mathfrak{F}(f)\,\mathfrak{F}(g)^*|} = e^{2\pi i(ux_0+vy_0)}$$

Um eine rotations- und skaleninvariante Registrierung zu erreichen, nutzt man eine logarithmische Polardarstellung der Amplitudenspektren der zu registierenden Bilder (auch bekannt als Fourier-Mellin Transformation) in Kombination mit einer Phasenkorrelation [ZF03].

Merkmalsbasierte Algorithmen: Die Anwendung von merkmalsbasierten Methoden ist besonders zu empfehlen, wenn die Bilder genug markante und leicht zu detektierende Objekte enthalten. Die Merkmale sollten mit einer hohen Ortsauflösung unabhängig von den zu erwartenden Bildstörungen und -transformationen zu detektieren sein. Im Gegensatz zu flächenbasierten Methoden bedienen sich merkmalsbasierte Methoden nicht direkt der Bildinformation, sondern repräsentieren Informationen auf einem abstrakteren Niveau. Aus diesem Grund sind merkmalsbasierte Methoden besonders für Messaufgaben mit Helligkeitsschwankungen und für Mehrsensorsysteme geeignet. Merkmale können in punkt-, linien- und flächenförmige Merkmale unterteilt werden. Flächenhafte Merkmale oder Regionen finden vor allem bei der Registrierung von Satellitenbildern Verwendung. Linienförmige Merkmale sind vor allem Kanten und Konturen, welche auf Basis bekannter Kantendetektoren, wie z.B. des Canny- oder auch des Sobel-Kantendetektors [Can86] extrahiert werden können. Unter den punktförmigen Merkmalen sind vor allem Ecken von Bedeutung, welche beispielsweise mit Hilfe des oft verwendeten Harris-Eckendetektors [HS88] identifiziert werden können [ZF03]. Im Folgenden wird besonders auf die neuere Entwicklung der punktförmigen Merkmalsdetektoren, auch Interest-Operatoren genannt, eingegangen. Der Harris-Eckendetektor basiert auf einer Auswertung der Eigenwerte der zweiten Momentenmatrix. Er ist rotations- aber nicht skaleninvariant. *Lindeberg* erweiterte den Algorithmus von *Harris und Stephens* um eine automatische Auswahl der Skala und untersuchte ebenfalls die Verwendung der Determinanten der Hesse-Matrix sowie der Spur der Hesse-Matrix, auch bekannt als Laplacian, zur Detektierung von punktförmigen Strukturen [Lin98]. Basierend auf dieser Methode folgte die Entwicklung zweier robuster und skalen-invarianter Merkmalsdetektoren von

Mikolajczyk und Schmidt, die unter den Bezeichnungen Harris-Laplace und Hessian-Laplace bekannt wurden [Mik03]. *Lowe* erreichte innerhalb des Scale invariant feature transform (SIFT)-Algorithmus durch einen Difference of Gaussian (DoG)-Filter eine Geschwindigkeitssteigerung [Low99, Low04]. Eine weitere Verbesserung konnte im Rahmen des Speeded Up Robust Features (SURF)-Algorithmus durch den Einsatz einer Approximation der Determinante der Hesse Matrix erreicht werden [BTVG08]. Im Vergleich der verschiedenen aktuellen Algorithmen ist der SURF - Algorithmus im Bezug auf Geschwindigkeit überlegen [MS05, BSP07].

Nach der Extraktion der Merkmale folgt der Merkmalsabgleich, das sogenannte „Matching“. Dabei gilt es zwischen den extrahierten Merkmalssätzen der beiden Bilder korrespondierende Merkmalspaare zu bilden. Die Algorithmen zum Merkmalsabgleich werden nach [ZF03] in vier Kategorien eingeteilt:

- Methoden, die räumliche Relationen nutzen
- Methoden, die invariante Deskriptoren nutzen
- Relaxationsmethoden
- Pyramiden und Wavelets

Für das Verständnis dieser Arbeit sind insbesondere Methoden, die auf einer Ausnutzung von räumlichen Relationen und Merkmalsdeskriptoren basieren von Bedeutung. Die **Methoden, die räumliche Relationen** zwischen den Kontrollpunkten ausnutzen, werden insbesondere dann eingesetzt, wenn die erkannten Merkmale nicht eindeutig oder ihre Nachbarschaft lokal gestört ist [ZF03]. *Barrow et al.* benutzen im Rahmen des sogenannten „chamfer matching“ linienhafte Merkmale und glichen diese auf Basis einer Minimierung der generalisierten Abstände ab [BTBW77]. Dieser Algorithmus wurde durch *Borgefors* durch den Einsatz einer Distanztransformation verbessert [Bor88]. Aus der Registrierung von 3D-Messdaten, besonders im medizinischen Bereich, ist der weitverbreitete Iterative-Closest-Point-(ICP-)Algorithmus bekannt [BM92, Zha92]. Der ICP-Algorithmus wird beispielsweise bei der Registrierung von MRI/CAT-Aufnahmen [FA94, SH95] genutzt. Auf Basis einer Kombination der Vorarbeiten von *Borgefors* und dem ICP-Algorithmus mit einem nichtlinearen Optimierungsalgorithmus (Levenberg-Marquardt) hat *Fitzgibbon* [Fit03] den LM-ICP-Algorithmus entwickelt. Der Einsatz von **Merkmalsdeskriptoren** zum Merkmalsabgleich findet eine weite Verbreitung. Nach *Zitova et al.* sollten von den Deskriptoren folgende Bedingungen erfüllt werden:

- **Invarianz:** D.h. Invarianz gegenüber den zu erwartenden Störungen, Deformationen und Transformationen.
- **Eindeutigkeit:** Zwei unterschiedliche Merkmale sollten eine unterschiedliche Deskription haben.

- **Stabilität:** Die Deskription sollte auch bei der Anwesenheit von unbekannten Einflüssen stabil sein.
- **Unabhängigkeit:** Bei der Verwendung von mehreren Deskriptoren in einem Vektor sollen diese untereinander unabhängig sein.

In der Vergangenheit wurde eine große Anzahl von Merkmalsdeskriptoren entwickelt. Es zeigt sich in einem großen Vergleich aktueller, bestehender Merkmalsdeskriptoren (z.B. PCA-SIFT, momenten-basierte Invariante, Kreuzkorrelation usw.), dass der SIFT-Algorithmus von *Lowe* [Low04] zur Zeit gängigen anderen Methoden überlegen ist [MS05]. In einem weiteren Vergleich wurde gezeigt, dass der SURF-Algorithmus bei ungefähr gleicher Erkennungsrate wie SIFT, schneller ist [BSP07, JG09].

Im dritten Schritt der Bildregistrierung müssen Typ und Parameter des Transformationsmodells bestimmt werden. Der Typ des Transformationsmodells ist im Großteil der Anwendungsfälle durch Vorwissen gegeben. Dadurch wird der Suchraum stark eingeschränkt. Man unterscheidet zwischen lokalen und globalen Transformationsmodellen [ZF03]. Für die Erkennung von Markern in Mikroskopbildern sind nur globale Transformationen von Bedeutung. Die Parameter der Transformation können implizit oder explizit gegeben sein. Bei der ICP werden die Parameter im Rahmen des Matching-Prozesses implizit über die Optimierung generiert. Bei der Anwendung des SURF-Algorithmus müssen die Parameter erst noch aus den abgeglichenen Merkmalspaaren bestimmt werden. Grundsätzlich kann das Transformationsmodell durch die bekannte Methode der Summe der kleinsten Quadrate aus den Kontrollpunkten bestimmt werden. Ist jedoch der Anteil von Ausreißern innerhalb der abgeglichenen Merkmale hoch, liefern robustere Methoden wie der Random-Sample-Consensus-(RANSAC-)Algorithmus bessere Ergebnisse [FB81].

Kapitel 3

Regelungstechnische Charakterisierung des Rasterkraftmikroskops

Die Komplexität der Regelung von Rasterkraftmikroskopen kann sich negativ auf die Qualität der Messergebnisse auswirken, da die Anzahl und der Sinn der Stellparameter sowie deren gegenseitige Abhängigkeiten für den Bediener nicht mehr durchschaubar sind beziehungsweise den Bediener überfordern. Es ist sehr viel Erfahrungswissen für einen sicheren Umgang mit Rasterkraftmikroskopen notwendig. Aus diesem Grund wird am Beispiel des vorliegenden Systems des „SIS Ultraobjective“ exemplarisch die Messdynamik eines AFM-Sensors charakterisiert. Der Regelkreis des Rasterkraftmikroskops ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

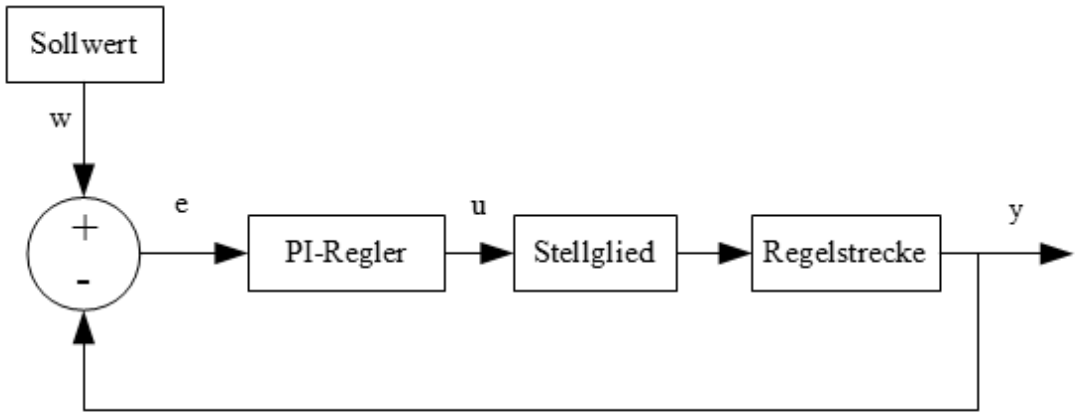


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Regelkreises des SIS Ultraobjective.

Der Regelkreis besteht aus einem digitalen Proportional-Integral-Regler, dem Stellglied und der Regelstrecke. Das Stellglied besteht aus einem Leistungsverstärker und dem Piezoaktuator. Die Regelstrecke besteht aus dem Cantilever, der Cantileverspitze und der Probenoberfläche. Als Sensor dient ein Fabry-Pérot-Interferometer, welches die Auslenkung beziehungsweise Schwingung des Cantilevers misst. Im Kontaktmodus wird als Regelsignal vom Fabry-Pérot-Interferometer die Auslenkung des Cantilevers gemessen. Im Nichtkontaktmodus wird die Amplitude der Schwingung des Cantilevers als Regelsignal genutzt. Das Messsignal wird aus der Ausdehnung des Pie-

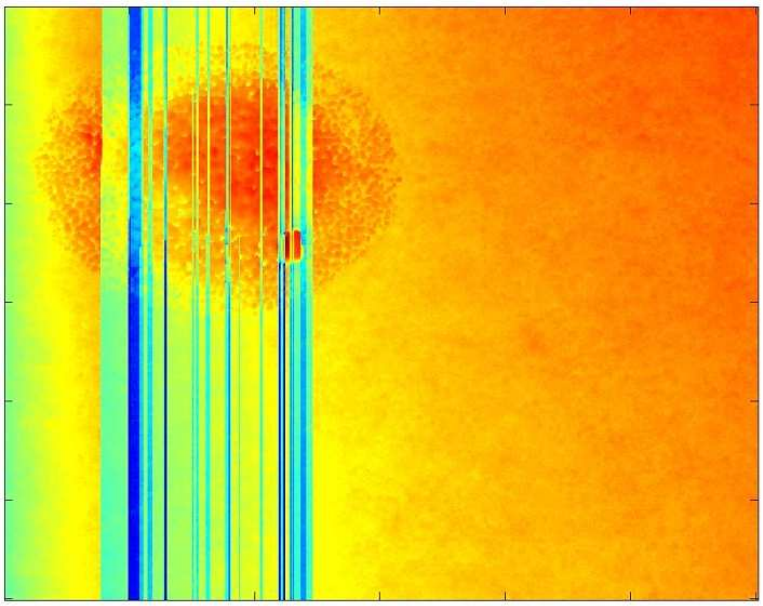


Abbildung 3.2: AFM-Messung eines Tropfens Partikeltinte (Messparameter: Messgeschwindigkeit $25\,\mu\mathrm{m/s}$; Messfeldgrösse: $600\,\mu\mathrm{m} \times 550\,\mu\mathrm{m}$) (mit freundlicher Genehmigung von H.Rothe [RUCK05]).

zoaktuators mit Hilfe eines Dehnmessstreifens gewonnen. Um eine Aussage über das dynamische Verhalten und die Grenzen des vorliegenden Rasterkraftmikroskops zu machen, ist es zuallererst notwendig, die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises zu untersuchen. Der offene Regelkreis besteht aus Stellglied und Regelstrecke.

3.1 Gerätespezifische Artefakte

Neben der Charakterisierung der Messdynamik des Systems wird das Auftreten von gerätespezifischen Messartefakten, die in Form von Sprüngen der Höhenwerte innerhalb und zwischen Messlinien im Kontaktmodus auftreten (siehe Abbildung 3.2), untersucht. Es gilt Möglichkeiten zur Unterdrückung dieser Artefakte zu finden. Das Interferometer des Rasterkraftmikrokops wertet allein die Intensität der interferierenden Teilstrahlen aus. Allerdings wird die Anzahl der durchlaufenen Ordnungen nicht ausgewertet. Der gängige Erklärungsansatz für das Auftreten der Messartefakte ist, dass das Springen der Höhenwerte durch einen Sprung des Interferometersignals des AFMs um eine oder mehrere Perioden erzeugt wird. Mit steigender Messgeschwindigkeit und dem Vorhandensein von scharfen, hohen sowie sprungförmigen Oberflächentopologien steigen die Anforderungen an die Regelung. Somit ist die räumliche Nähe der Artefakte zu derlei Oberflächenstrukturen zu erklären. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz zur Minimierung der Sprungartefakte zielt auf eine Erhöhung der Bandbreite des geschlossenen Regelkreises ab.

Neben Sprüngen im Interferometersignal gibt es noch Artefakte, welche die Oberflächentopologie langwellig überlagern (siehe Abbildung 3.3). Bei solchen Artefakten wird Streulicht vom Faserinterferometers von der Probenoberfläche zurück in das Interferometer reflektiert [YK08]. Ein prin-

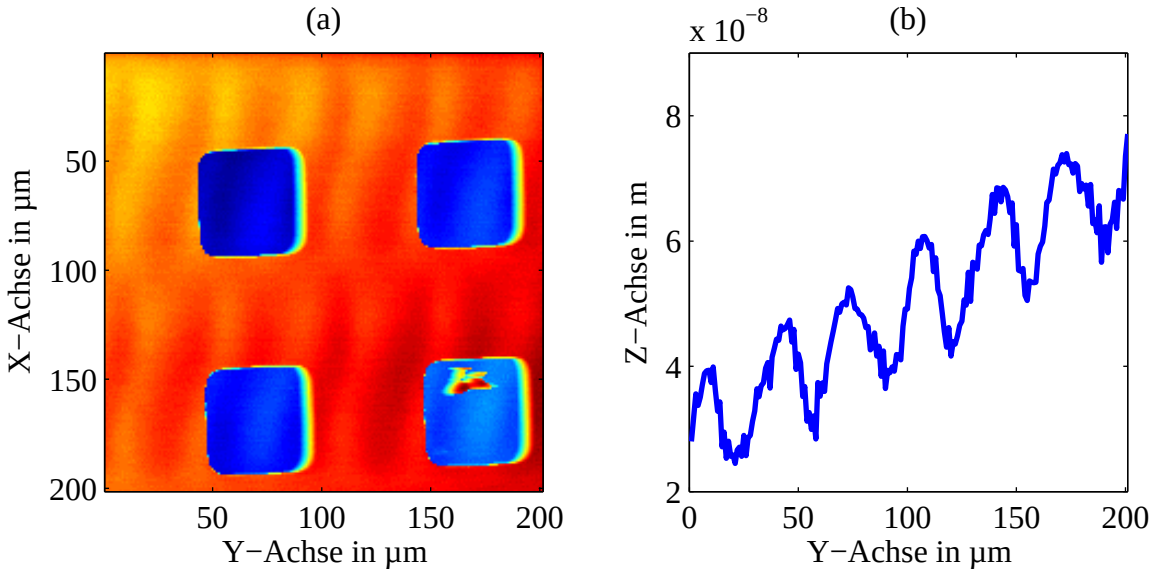


Abbildung 3.3: Wellenförmige Artefakte durch den Einfluß von Streulicht: (a) AFM-Messung mit wellenförmigem Artefakt (b) Schnitt in Y-Richtung durch (a) bei $x = 120\,\mu\mathrm{m}$.

zipbedingter Anteil des Rauschens des Interferometersignals wird durch die thermische Anregung des Cantilevers erzeugt. Ebenso ist der Lichtwellenleiter des Faserinterferometers anfällig für die Einkopplung von mechanischen Schwingungen.

3.2 Parameteridentifikation

Zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Piezoaktors wird eine Systemidentifikation durchgeführt. Mit Hilfe eines PC mit DSP-Karte wird unter Matlab ein sinusförmiges Testsignal generiert. Das Testsignal wird bei abgeschalteter Regelung als Stellgröße auf den Leistungsverstärker des Piezoaktuators gegeben. Die Auslenkung des Piezoaktuators wird mit Hilfe des in den Piezoaktuator eingebauten Dehnmessstreifens gemessen.

Die Auswertung der Messung (siehe Abb. 3.4) zeigt ein Tiefpassverhalten mit einer ungewöhnlich niedrigen Grenzfrequenz von 150 Hz. Die Rücksprache mit SIS ergab, dass das Signal des Dehnmessstreifens gefiltert wird. Abweichend von den Messungen sprach SIS von einer Tiefpassfilterung mit einer Grenzfrequenz von 250 Hz. Nach Umgehung des Filters zeigt sich die wirkliche Dynamik des Piezoaktors (siehe Abb. 3.5). Es wurde der Amplituden- und Phasengang des Systems ohne Filterung aufgezeichnet. Die Grenzfrequenz des Systems liegt bei 2,066 kHz. Außerdem ist aus den Messungen ersichtlich, dass sich das Stellglied durch ein System 2.Ordnung approximieren lässt. Nach der Charakterisierung des Stellgliedes wird die Regelstrecke untersucht. Hierbei werden Methoden zur Bestimmung der Parameter der Übertragungsfunktion des Cantilevers verglichen. Ebenso wird die Interaktion der Cantileverspitze mit der Probenoberfläche

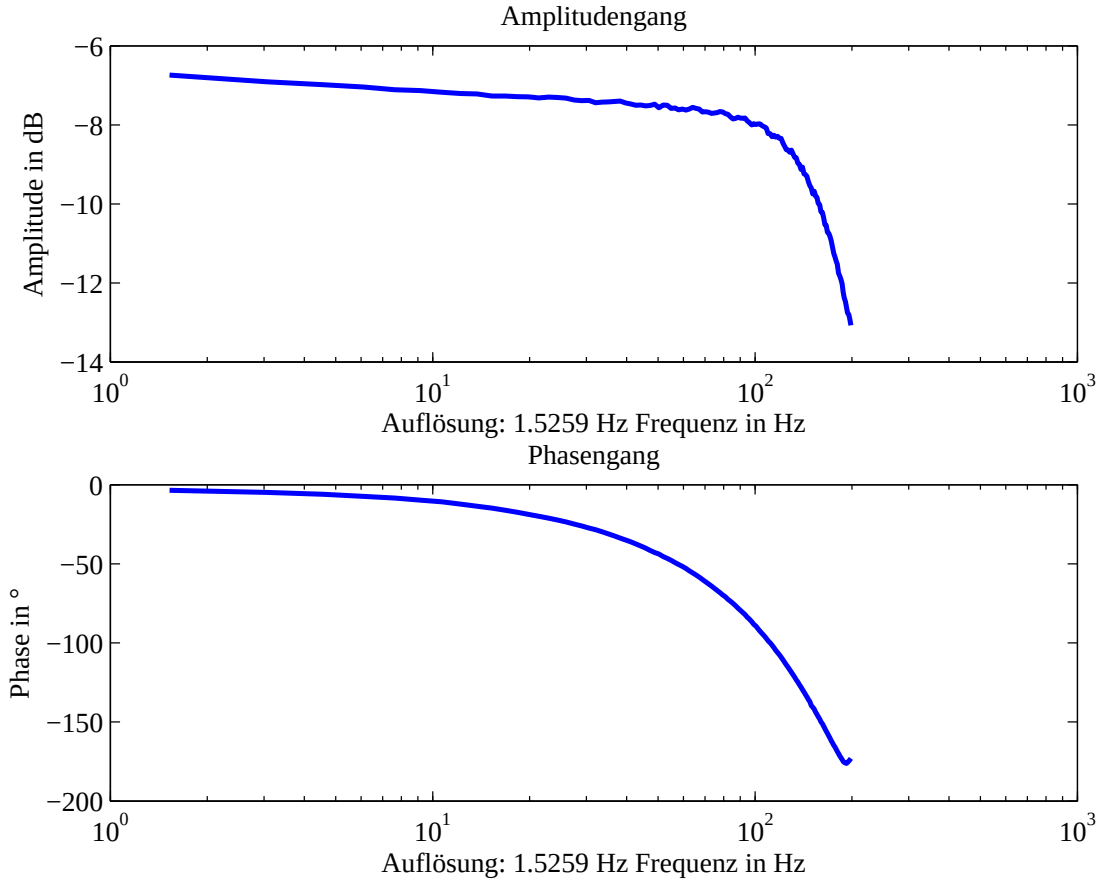


Abbildung 3.4: Bodediagramm der Übertragungsfunktion des Stellglieds.

untersucht.

Die Bestimmung der Federkonstante des Cantilevers k_c ist unumgänglich um eine Aussage über die Dynamik des Gesamtsystems zu machen. Neben der Federkonstante spielt auch die Dämpfung des Cantilevers γ_D eine wichtige Rolle. Bei einkristallinen Siliziumcantilevern ist die Materialdämpfung sehr gering. Der Hauptteil der Dämpfung entsteht durch die Reibung mit dem umgebenden Medium und an der Materialpaarung zwischen Silizium und den zur Erhöhung der Reflexion aufgebrachten Metallschichten. Es gilt ein robustes Verfahren zur Extraktion der Parameter k_c und γ_D unter Nutzung des Fabrye-Perot-Interferometers zu implementieren. Der AFM-Controller gibt das ungefilterte analoge Interferometersignal über einen BNC-Ausgang aus. Mit Hilfe eines PC mit DSP-Karte wird das Signal ausgewertet. Dazu eignen sich zwei der in Kapitel 2 beschriebenen Methoden, die Sader-Methode und die Thermal-Noise-Methode. Exemplarisch werden Kontaktmode-Cantilever der Firma Nanosensors untersucht. In Abbildung 3.6 ist das Amplitudenspektrum des Interferometersignals eines Cantilevers gezeigt. An den Peak der ersten Resonanzfrequenz wird die Funktion:

$$P(\omega) = A_{white} + \frac{B\omega_0^4}{\left(\omega^2 - \omega_0^2\right)^2 + \frac{\omega^2\omega_0^2}{Q^2}} \tag{3.1}$$

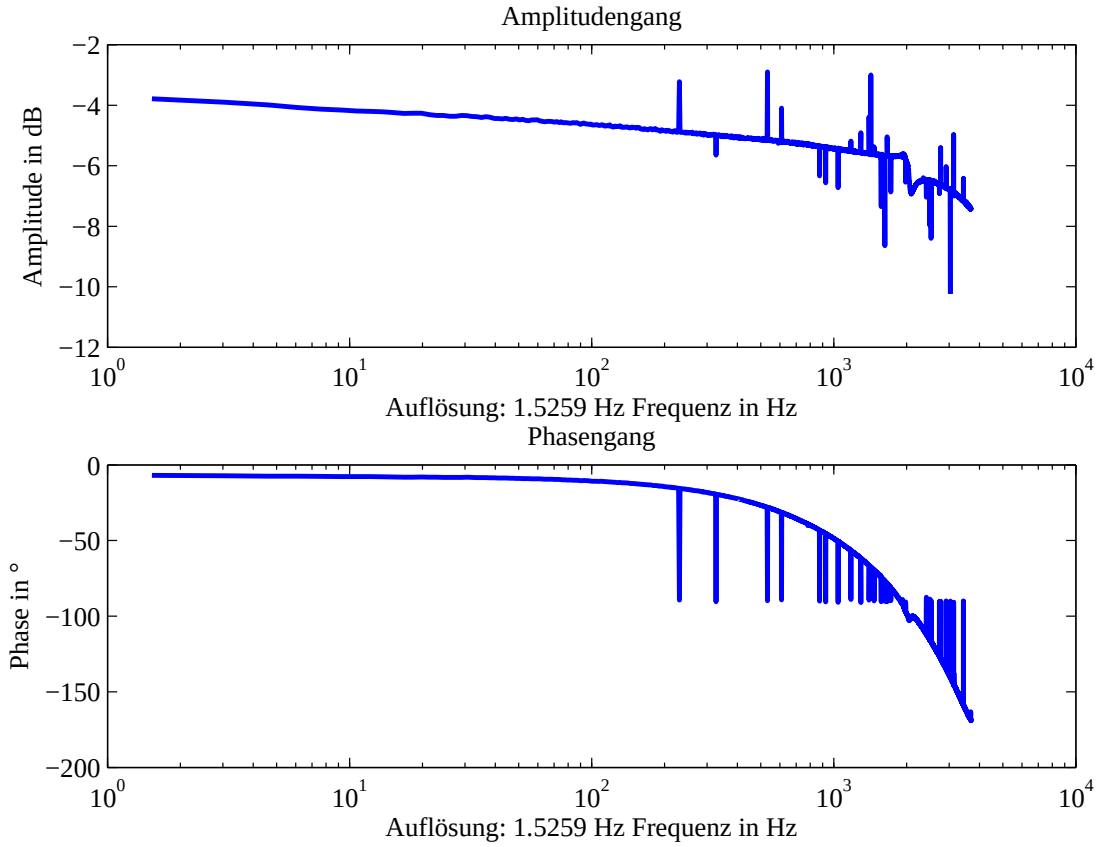


Abbildung 3.5: Bodediagramm der Übertragungsfunktion des Stellglieds (ohne Tiefpassfilter).

angepasst [Sad99]. Als relevante Parameter werden ω_0 und Q extrahiert. Mit Hilfe der Gleichung 2.6 kann nun die Federkonstante auf Basis der Sader-Methode bestimmt werden. Alternativ wird die Federkonstante auf Basis der Gleichung 2.8 über das quadratische Mittel der Auslenkung bestimmt. Es wird eine Kalibrierfunktion für die Federkonstante innerhalb der Steuersoftware der NCMM implementiert, um die Auflagekraft genau einzustellen zu können. Für die spätere Betrachtung im Gesamtsystem kann der Cantilever als linearer Faktor modelliert werden, da seine erste Resonanzfrequenz mit Werten bei ca. $10\,\mathrm{kHz}$ weit jenseits der Bandbreite des Piezoaktors (bis $2{,}066\,\mathrm{kHz}$) liegt.

Die stark nichtlineare Funktion der Kontaktkraft kann über Kraftabstandskurven dargestellt werden. Aufgrund des starken Rauschens des Messsignals ist der Zweck der in Abbildung 3.7 aufgenommene Kurve nur die Veranschaulichung des Sachverhalts. An der Kurve können verschiedene Charakteristiken der Messdyamik eines AFMs erläutert werden.

Die Abbildung 3.7 ist wie folgt zu lesen: Die Annäherung erfolgt von rechts mit einem positiven Abstand. Zu diesem Zeitpunkt gibt es noch keine Interaktion zwischen Cantilever und Probenoberfläche. Mit sinkendem Abstand wirkt eine stärker werdende, anziehende Kraft auf den Cantilever, die den Cantilever im Gleichgewicht mit der Federkraft verbiegt. Bei noch stärkerer Annäherung kommt es zu einer sogenannten Kontaktsingularität, d.h. die anziehende Oberflächenkraft ist deut-

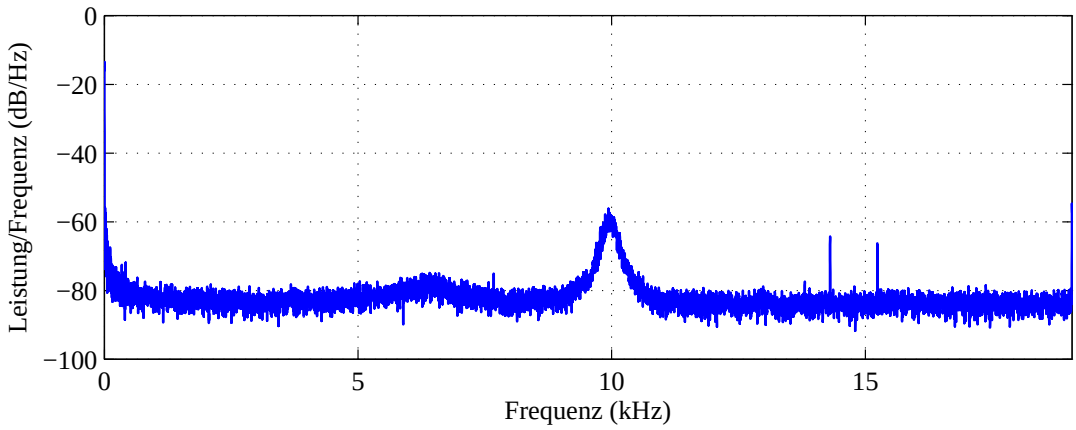


Abbildung 3.6: Leistungsspektrum des Interferometersignals des AFMs.

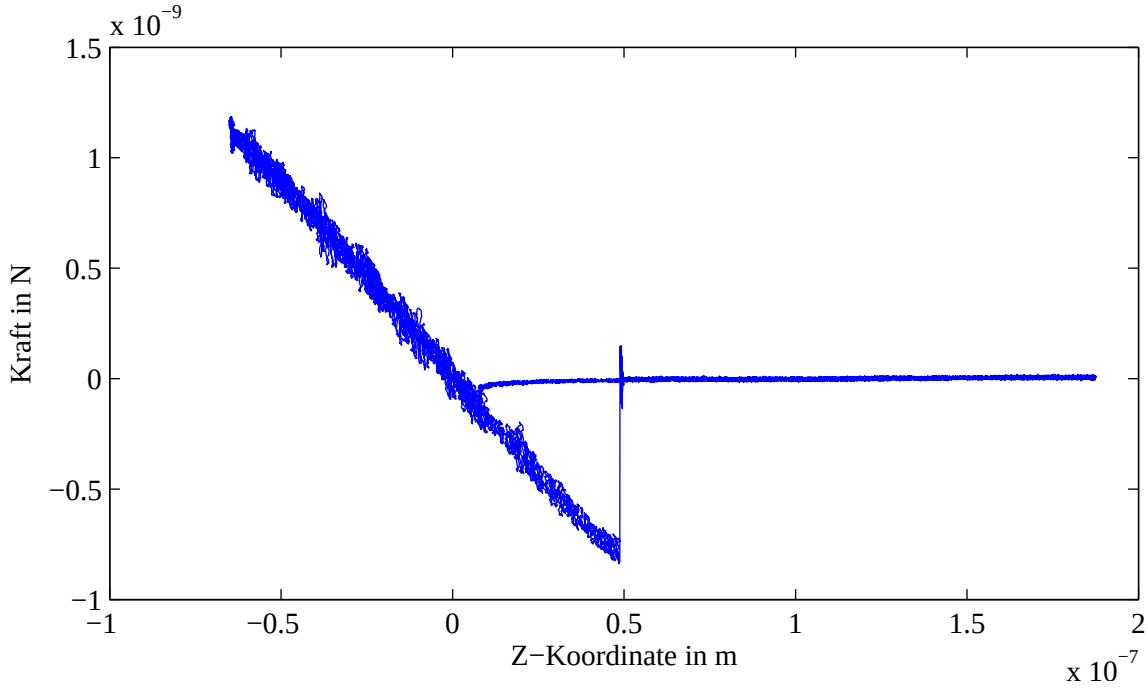


Abbildung 3.7: Kraftabstandskurve.

lich stärker als die Federkraft des Cantilevers. Dies führt zu einem abrupten Oberflächenkontakt. Danach erfolgt ein linearen Anstieg der Kraft, welche durch das Anpressen der Cantileverspitze an die Probenoberfläche und die daraus resultierende Hertzsche Pressung beschrieben werden kann. Bewegt man den Cantilever aus dem Kontakt heraus, so kommt es zu einer zweiten Kontaktsingularität. Die zweiten Kontaktsingularität wird durch das „Festkleben“ des Cantilever aufgrund von anziehenden Oberflächenkräften hervorgerufen. Aus regelungstechnischer Sicht muss das Auftreten der Kontaktsingularitäten absolut vermieden werden. Aus diesem Grund wird das AFM im Kontaktmodus immer in der linearen Zone der Kraft-Abstands-Funktion mit einer positiven Kontaktkraft betrieben. Zur Gewinnung der vollständigen Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises werden Messungen im Kontaktmodus durchgeführt. Dazu wird das System durch verschiedene Multisinussignale angeregt. Mit Hilfe der System Identification Toolbox von Matlab wird auf Basis der Prediction-Error-Methode [Lju99] ein Systemmodell (siehe Abbildung 3.8) gewonnen. Bei dem identifizierten Systemmodell handelt es sich um ein gedämpftes PT_2-Glied mit der Form:

$$G(s) = \frac{K}{1 + 2DTs + T^2 s^2}$$

Das identifizierte System hat seine Resonanzfrequenz bei $1{,}898\,\mathrm{kHz}$ mit einen Dämpfungsfaktor D von $0{,}79$.

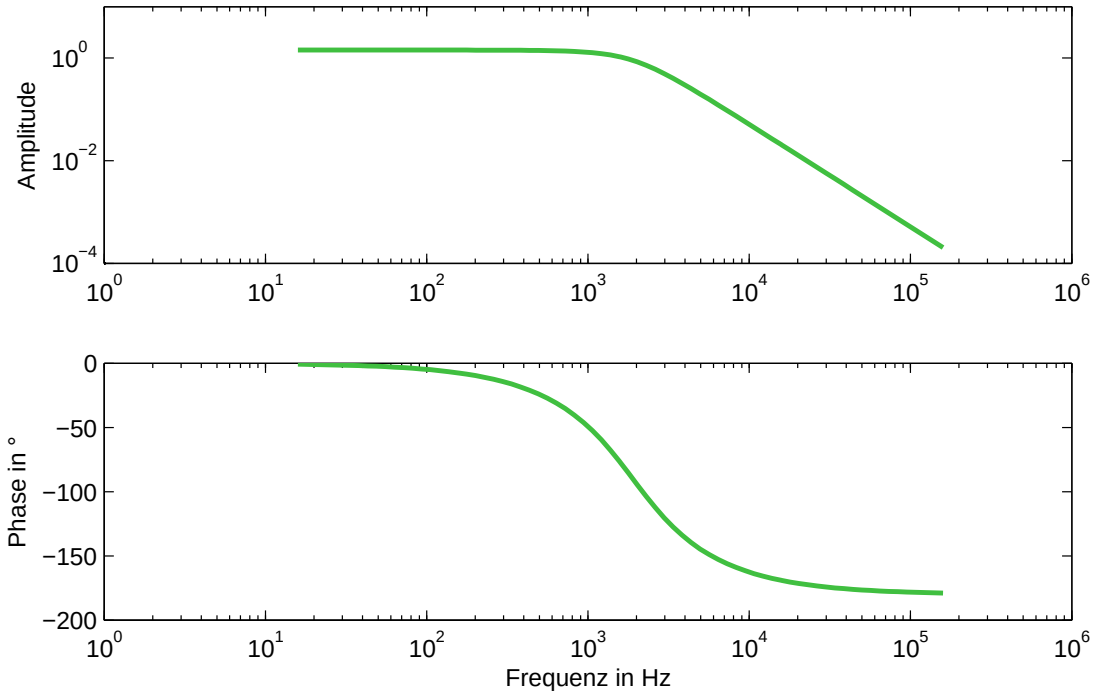


Abbildung 3.8: Amplitudenfrequenzgang der Regelstrecke (gemessen auf einem Ebenheitsnormal mit SiC-Oberfläche).

3.3 Optimierung der Regelung

Die Variation der Regelungsparameter um die vom Hersteller vorgeschlagenen Werte ergaben nur minimale Verbesserungen der dynamischen Eigenschaften des AFMs. Die empirisch ermittelten, optimalen Regelparameter liegen bei einem P-Anteil von $0{,}00105$ und einem I-Anteil von $16{,}667\,\mu\mathrm{s}$. Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises hat bei diesen Regelparametern eine Grenzfrequenz von $163\,\mathrm{Hz}$ (siehe Abbildung 3.9). Die Erhöhung der Bandbreite des Gesamtsystems reduziert die Regelabweichungen beim Kantensprung an steigenden Flanken. Problematisch erweisen sich, insbesondere bei einer weiteren Erhöhung der Bandweite, die Schwingungen an fallenden Flanken (siehe Abbildung 3.10). Diese Schwingungen entstehen durch nicht modellierte Effekte. Jegliches AFM wird im Kontaktmodus mit Hilfe einer positiven Kontaktkraft innerhalb des linearen Bereichs der Kraft-Abstands-Kurve betrieben. Bei fallenden Flanken kann es zum Kontaktabriss und dem Auftreten der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Kontaktsingularität kommen. Ein Abriss des Oberflächenkontakts und die daraus resultierende Kontaktsingularität können nicht durch eine einfache Regelung beherrscht werden. Es zeigte sich, dass die Erhöhung der Bandbreite durch die schnellere Reglereinstellung nicht ausreichte, um die Sprungartefakte vollständig zu beseitigen. Eine weitere Erhöhung der Bandbreite ist nicht möglich, da das System schon an seinen Grenzen arbeitet.

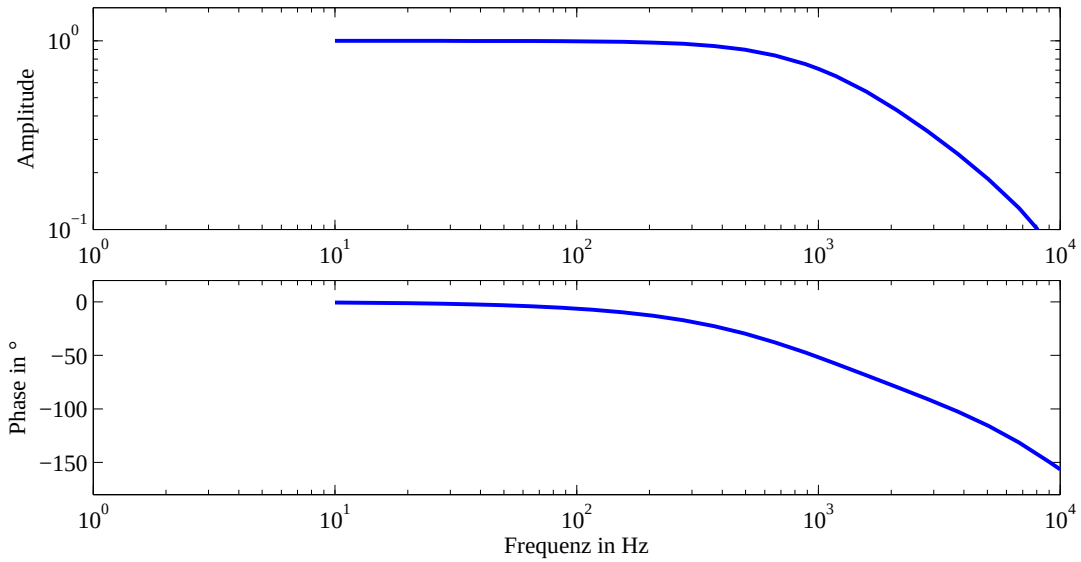


Abbildung 3.9: Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises bei einem P-Anteil von $0{,}00105$ und einem I-Anteil von $16{,}667\,\mu\mathrm{s}$.

Eine weitere stabilisierende Maßnahme ist die Erhöhung der Auflagekraft. Durch eine Erhöhung der Auflagekraft wird der stabilisierende Puffer zwischen dem aktuellen Arbeitspunkt und einer zu vermeidenden Kontaktsingularität erhöht. Der Spielraum für die Erhöhung der Auflagekraft ist durch das interferometrische Messprinzip über die Laserwellenlänge begrenzt und kann nur über eine Vergrößerung der Federkonstante des Cantilevers erweitert werden. Für diese Untersuchungen

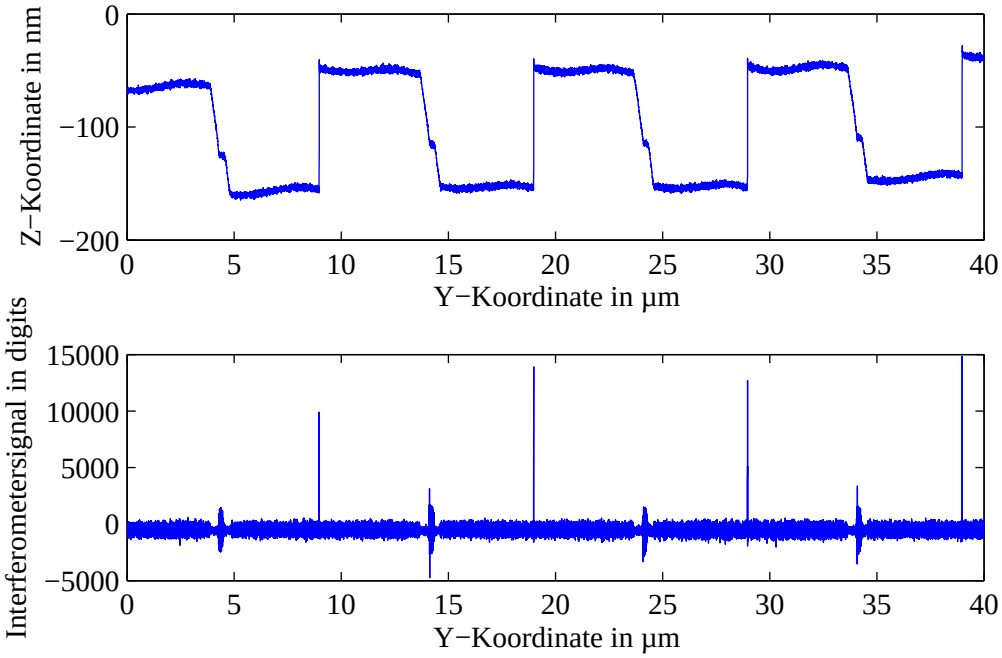


Abbildung 3.10: Profilmessung einer 2D-Gitterstruktur (Höhe: $200\,\mathrm{nm}$, Pitch: $10\,\mu\mathrm{m}$, Messgeschwindigkeit: $1\,\mu\mathrm{m/s}$) mit Regler des AFM-Controllers: (a) Signal des Dehnmessstreifens (b) Interferometersignal.

wurden Cantilever mit einer Federkonstante von $3\,\mathrm{N/m}$ verwendet. Die Erhöhung der Federkonstante des Cantilevers hat einen weiteren Effekt. Die Regelabweichungen an Kanten stellen eine Abweichung von der eingestellten Auflagekraft ΔF dar. Über die Federkonstante des Cantilevers k_c ist die Abweichung vom Arbeitspunkt ΔF mit einer zusätzlichen Auslenkung des Cantilevers von ΔZ verbunden. Ist die zusätzliche Verbiegung ΔZ zu groß, springt das Interferometer um eine Periode. Durch eine Erhöhung der Federkonstante wird ebenfalls die Toleranz für die vorhandenen Regelabweichungen vergrößert. Es zeigt sich, dass durch die Erhöhung der Federsteifigkeit, gepaart mit einer Erhöhung der Auflagekraft, die Sprungartefakte auch bei hohen Messgeschwindigkeiten effektiv verhindert werden konnten (siehe Abbildung 3.11). Es ist jedoch anzumerken, dass eine Erhöhung der Auflagekraft und der Federkonstante die mechanische Belastung für die Probe und den Cantilever erhöhen. Die regelungstechnische Charakterisierung des Systems zeigt, dass das System aus messtechnischer Sicht keine guten Eigenschaften hat. Ein glatter Amplituden- und Phasengang ist unerlässlich für eine korrekte messtechnische Auswertung. Diese Eigenschaft ist beim vorliegenden System nicht gegeben.

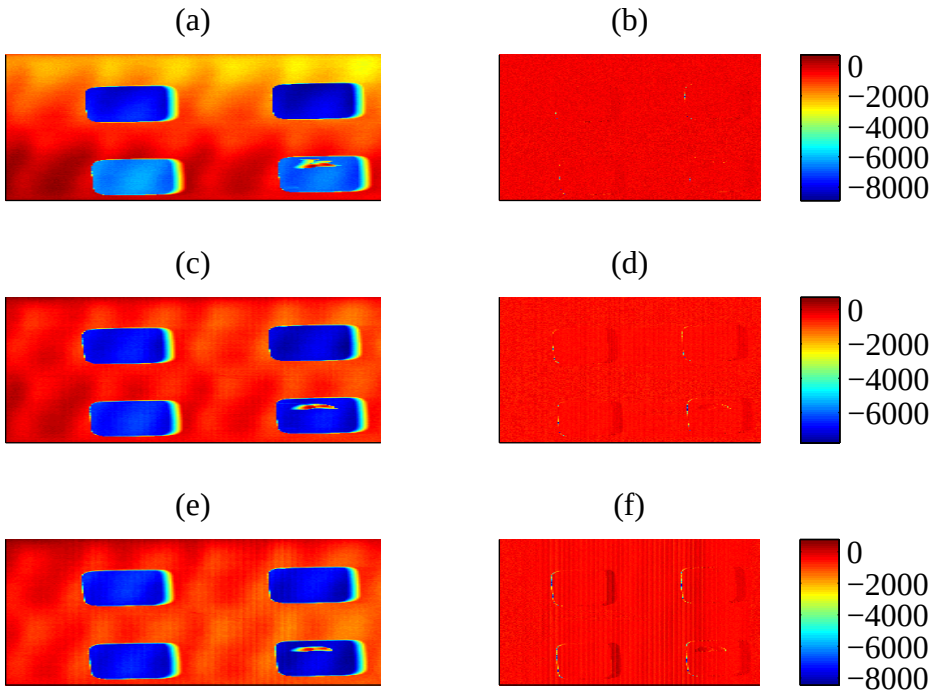


Abbildung 3.11: AFM-Messung eines Gitternormal (Messfeldgrösse: $40\,\mu\mathrm{m} \times 40\,\mu\mathrm{m}$) mit $100\,\mathrm{nN}$: (a), (c), (e) AFM-Messung mit $5\,\mu\mathrm{m/s}$, $10\,\mu\mathrm{m/s}$ und $20\,\mu\mathrm{m/s}$ (b), (d), (f) Interferometersignal (entspricht den Regelabweichungen).

3.4 Ansätze zur weiteren Optimierung der Messdynamik

Die optimale Einstellung der Parameter des PI-Reglers ist im wissenschaftlichen Alltag zeitraubend und langsam. Außerdem stellt sich die Frage, ob die aufgrund von Einstellregeln empirisch gefundenen Parameter wirklich optimal sind und in welchen Grenzen und mit welchen Unsicherheiten sie gelten. Durch einen modellbasierten Regelungsansatz werden geringe Änderungen im System (beispielsweise durch einen Cantileverwechsel) über die Robustheit in den Reglerentwurf einbezogen. Ziel der Untersuchung ist die Implementierung und Validierung einer neuen Reglerstruktur basierend auf einen Field Programmable Analog Array (FPAA). Zum Betrieb der neuen Reglerstruktur wird die interne Regelung des AFM-Controllers abgeschaltet und das System über zusätzlich vorhandene analoge Aus- und Eingänge angesteuert. Bei den regelungstechnischen Untersuchungen wird ein dynamisch programmierbarer analoger Signalprozessor (dpASP), der AN231E04, der Firma Anadigm zur Implementierung des Reglers genutzt und hinsichtlich seiner Eignung in einem zukünftigen System getestet. DpASP verarbeiten analoge Signale in IO-Zellen und sogenannten konfigurierbaren analogen Blöcken (CAB). Die CAB bestehen aus einem oder mehreren Operationsverstärkern (OPV), sowie passiven Bauelementen, die durch getakte Schalter miteinander verknüpft sind. Zur Realisierung bestimmter analoger Funktionen können die passiven Bauelemente entweder konventionell oder als geschaltete Kapazitäten betrieben werden. Die Programmierung der CAB erfolgt über einen externen nichtflüchtigen Speicher oder einen

Steuerprozessor. Die Schaltungen können während des Betriebs innerhalb eines Takts dynamisch rekonfiguriert werden. Diese Eigenschaften machen dpASP zu idealen Werkzeugen beim Entwurf und Test von Regelungen, Filtern und komplexeren analogen Schaltungen [Ana06]. Zur Konditionierung der Eingangs- und Ausgangssignale des dpASP werden Operationsverstärker aus der Kommunikationstechnik verwendet (AD-8130, AD-8132). In den ersten Experimenten wurde zu Testzwecken, auf Basis des aus der Systemidentifikation gewonnenen Modells, ein PI-Regler implementiert. Der PI-Regler ist aus einem nichtinvertierenden Integrator und einem invertierenden Summierer aufgebaut (siehe Abbildung 3.12). Der in den FPAA programmierte PI-Regler kann leider nur im begrenzten Maße langsamer gestellt werden, da die Regelparameter an die Frequenz der internen Taktgeber und die Abtastrate gekoppelt sind. Die Einstellung des Reglers auf Basis des FPAA ist mit einer Bandbreite von 198 Hz etwas schneller als die optimalen Reglerparameter des AFM-Controllers. Die schnellere Reglereinstellung verstärkt die Schwingungen an fallenden Flanken (siehe Abbildung 3.13). Die Referenzmessung demonstriert die Funktionsfähigkeit der neuen Reglerstruktur.

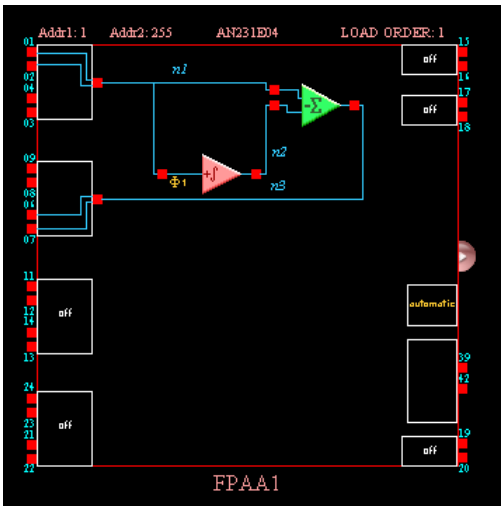


Abbildung 3.12: Implementierung des PI-Reglers auf einem dpASP.

Nach der erfolgreichen Implementierung eines PI-Reglers auf dem FPAA werden nun die Ergebnisse der Untersuchungen bezüglich der Implementierung einer modellbasierten Regelung vorgestellt. Eine modellbasierte Regelung für Rasterkraftmikroskope und deren Implementierung auf einem FPAA wurden schon in früheren Arbeiten von Schitter [SSA03] untersucht. Basierend auf diesen Vorarbeiten wird das H_∞-Theorem genutzt, um einen optimalen Regler zu berechnen. Der Begriff H_∞-Theorem steht für einen Funktionsraum asymptotisch stabiler Funktionen, welcher durch die unendlich Norm $\|\cdot\|_\infty$ beschränkt ist.

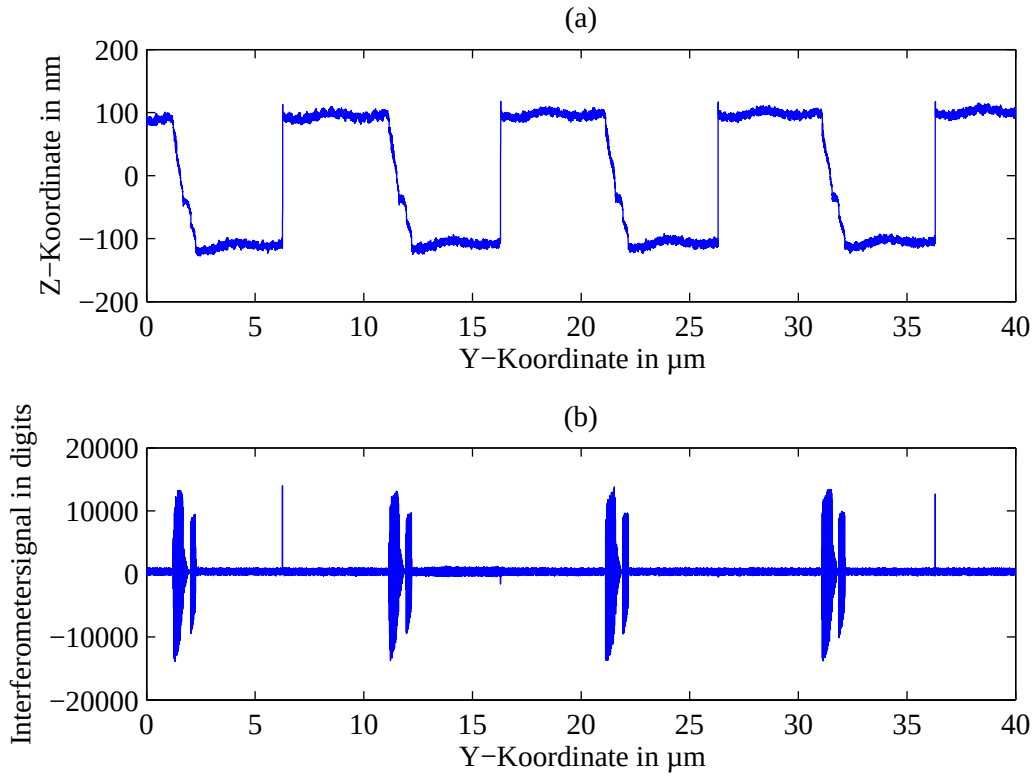


Abbildung 3.13: Profilmessung einer 2D-Gitterstruktur (Höhe: $200\,\mathrm{nm}$, Pitch: $10\,\mu\mathrm{m}$, Messgeschwindigkeit: $1\,\mu\mathrm{m/s}$) mit FPAA-Regler: (a) Signal des Dehnmessstreifens (b) Interferometersignal.

Zur Anwendung des H_∞-Theorems muss das System (siehe Abbildung 3.1) in folgende Form gebracht werden:

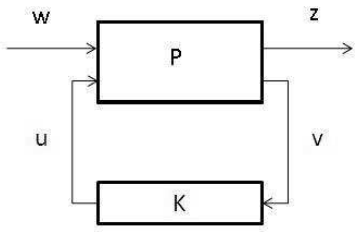


Abbildung 3.14: Generalisiertes Stellglied.

Für die generalisierte Regelstruktur ergibt sich folgende mathematische Beschreibung:

$$\begin{bmatrix} z \\ v \end{bmatrix} = P(s) \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \tag{3.2a}$$

$$u = K(s)v \tag{3.2b}$$

In die Lösung des Optimierungsproblems fließen Grenzen (z.B. maximale Werte der Ein- und Ausgänge des Systems) und Optimierungsdirektiven (z.B. bleibende Regelabweichung und An-

forderungen an die Bandbreite des geschlossenen Systems) durch die Gewichtsfunktionen W_1 und W_2 ein (siehe Abbildung 3.15).

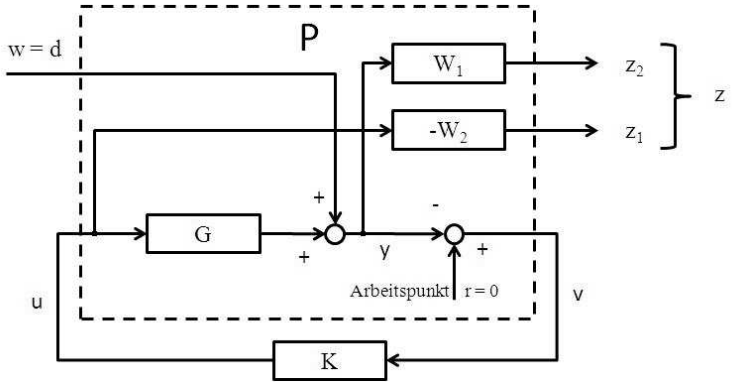


Abbildung 3.15: Generalisiertes Stellglied mit Gewichtsfunktionen.

$$P_{11} = \begin{bmatrix} W_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad P_{12} = \begin{bmatrix} W_1 G \\ -W_2 \end{bmatrix}$$

$$P_{21} = -I \qquad P_{22} = -G$$

Die untere gebrochene lineare Transformation löst die Regelschleife auf und eliminiert die Parameter u und v:

$$F_l\,(P,K) = \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 K S \end{bmatrix}$$

mit

$$W_1 = \frac{\left(s/M^{1/n} + \omega_B\right)^n}{\left(s + \omega_B \cdot A^{1/n}\right)^n}$$

$$W_2 = B$$

Bei dem vorliegenden regelungstechnischen Problem bleibt der Sollwert r während der Messung konstant. D.h. die Aufgabe des Reglers ist nicht das Nachführen des Prozesses basieren auf einer sich ändernden Referenz, sondern alleine das Ausregeln von Störungen des Prozesses. Die Störungen sind dabei die Auswirkungen der wechselnden Topologie der Probenoberfläche auf das System des Cantilevers, dessen Auslenkung konstant gehalten werden soll. Aus diesem Grund gibt es bei diesem System nur zwei Gewichtsfunktion. W_1 dient zur Optimierung der Störgrößenübertragungsfunktion S, welche die Auswirkung der Störung w auf den Ausgang y beschreibt. Die Gewichtsfunktion W_2 setzt ein Grenze für Stellgröße u. Die Gewichtsfunktionen W_1 und W_2 stammen aus der Literatur [SP96]: Bei W_1 wird durch den Parameter ω_B die gewünschte Bandbreite des geschlossenen Regelkreises eingestellt. Der Parameter A mit $A << 1$ sorgt für ein

angenähertes Integralverhalten des Reglers und stellt die gewünschte bleibende Regelabweichung dar. Durch den Einsatz von Gewichtsfunktionen höherer Ordnung mit $n > 1$ kann die Geschwindigkeit des Reglers erhöht werden. Mit dem Reglerentwurf durch H_∞-Optimierung kann ein echtes Integralverhalten nur über einen Umweg erzeugt werden. Dazu sollte der Parameter A sehr klein gewählt werden. Die so erzeugte Übertragungsfunktion des Reglers hat in einer Nullstellen-Polstellen-Darstellung eine Polstelle nahe dem Ursprung. Diese Polstelle kann entfernt werden. Die Multiplikation der reduzierten Übertragungsfunktion des Reglers mit einen Integrator erzeugt echtes Integralverhalten. Die Zielstellung für die Optimierung ist es, einen Regler K zu finden, welcher $F_l\left(P,K\right)$ im Bezug auf die H_∞-Norm minimiert. Bei der Optimierung per H_∞-Norm ist es meist einfacher eine suboptimale Lösung als eine optimale Lösung γ_{min} zu finden. Die Optimierung erfolgt durch die Lösung zweier Riccati-Gleichungen [SP96, DGKF89, GD88]. Für das vorliegende System ist der Einsatz eines H_∞-Reglers nicht lohnenswert, da es sich um ein stark gedämpftes PT_2-Glied handelt, welches durch einen PI-Regler beherrscht werden kann. Die Möglichkeiten der Regelungstechnik zur Optimierung des vorliegenden Systems sind somit erschöpft. Eine Verbesserung der Messdynamik ist nur durch konstruktive Maßnahmen möglich (siehe Kapitel 7 - Ausblick).

Kapitel 4

Automatisierte Messungen mit Vorwissen

Eine AFM-Messung kann nur in einer linienhaften Art und Weise durch sogenannte Linienscans erfolgen. Um ein Flächenelement zu messen, wird die Oberfläche durch parallele, versetze Linienscans abgerastert. Diese Methode nennt man Rasterscan. Aufgrund dieser seriellen Messstrategie ist die Messgeschwindigkeit von entscheidender Bedeutung für die Gesamtdauer einer Messung. Dieser „Flaschenhals“ kann einerseits durch die Erhöhung der Messgeschwindigkeit des Systems (siehe Kapitel 3) oder aber durch effizientere Messstrategien beseitigt oder zumindest in seiner Wirkung minimiert werden. Durch die Nutzung von Vorwissen über die Probe können die zu messenden Areale erheblich minimiert werden, indem man nur noch die Areale misst, die für die Erfüllung der Messaufgabe von Bedeutung sind. Als Vorwissen werden alle Informationen bezeichnet, die vor und unabhängig von der AFM-Messung bekannt sind oder erhoben wurden. In einer laufenden Produktionslinie können CAD-Daten aus dem Designprozess als Vorwissen über die Probe genutzt werden. In der Forschung und Entwicklung beziehungsweise bei unbekannten Proben sind meist keine CAD-Daten vorhanden und man muss das Vorwissen auf andere Weise generieren.

4.1 Generierung von Vorwissen

Vorwissen kann auf vielfältige Art und Weise generiert werden. AFM-Messungen haben den Vorteil einer extrem hohen Auflösung, allerdings sind sie aufgrund des seriellen Messprinzips langsam im Vergleich zu parallelen Aufnahmeverfahren wie z.B. der optischen Messung mit einer CCD-Kamera. Man sollte aus diesem Grund für die Generierung von Vorwissen ein Messverfahren verwenden, welches parallel und damit schnell ist. Ziel ist es, bei der Generierung von Vorwissen eine grobe „Karte“ der Topographie der Probe zu bekommen und später auf Basis dieses Wissens ein Bezugskoordinatensystem und Messelemente in einem Messplan zu platzieren. Die Erzeugung von Vorwissen beinhaltet vier Schritte:

1. Messung der Rohdaten mittels eines kalibrierten, optischen Mikroskops oder eines Weißlichtinterferometers

2. Vorverarbeitung der Messdaten (Konvertierung, Detrending, Stitching, Verbesserung)

3. Extraktion der Messelemente und des Werkstückkoordinatenssystems für die zukünftige Messung mit der NCMM

4. Speicherung der extrahierten Informationen in „Dimensional Markup Language“ (DML)

Alle diese Schritte sind in einer graphischen Benutzerschnittstelle in Matlab implementiert. In dieser Arbeit werden ein Weißlichtinterferometer, das Zygo NewView 100 [Zyg94], ein Messmikroskop, das Carl Zeiss Axiotron [Car], sowie die neuen Messoptik der NCMM (siehe Kapitel 4.3) zur Messung der Rohdaten genutzt. Die Software des Weißlichtinterferometers speichert die Messpunktdaten in einer Binärdatei. Die Binärdaten werden in Matlab importiert. Die Messpunktdaten werden in eine zweidimensionale Matrix zur Nutzung von Bildverarbeitungsalgorithmen transformiert. Danach entfernt eine Detrending-Prozedur Offset, Verkippung und Ausreißer aus dem Messdaten. Instrumentenfehler wie der „Batwing“-Effekt beim Weißlichtinterferometer können ebenfalls entfernt werden. Nach dem Detrending können in einer Stitching-Prozedur einzelne Teilmessungen der Probenoberfläche zu einer kompletten Oberflächenkarte zusammengesetzt werden. In einem dritten Schritt kann der Benutzer geometrische Parameter der Messelemente mit Hilfe einer mausgesteuerten Schnittstelle und verschiedenen implementierten Kantenerkennungsalgorithmen extrahieren. Ein weiterer wichtiger Teil dieses Schritts ist die Generierung eines oder mehrerer Werkstückkoordinatensysteme. Die Werkstückkoordinatensysteme können an spezielle Oberflächentopologien wie Ätzmarken oder Kanten gelegt werden. In einem vierten Schritt werden das Werkstückkoordinatensystem und die Messelemente zur Übertragung an die NCMM nach DML exportiert.

4.2 Nutzung der Dimensional Markup Language als Transfer- und Endformat

Großflächige AFM-Messungen erzeugen große Mengen an Messdaten. Beispielsweise erzeugt eine AFM-Messung auf einer Fläche mit den Abmaßen $1000\,\mu\mathrm{m} \times 100\,\mu\mathrm{m}$ und einem Messpunktabstand von $100\,\mathrm{nm}$ 10^7 Messpunkte und mehr als 640 MB Messdaten [Pet03]. Die effiziente Verarbeitung, Repräsentation und Handhabung der Messdaten gestaltet sich problematisch. Eine Speicherung der Daten in serieller binärer Form als Text-Datei führt aufgrund der seriellen Datenstruktur zu langen Verarbeitungszeiten und hohen Speicheranforderungen. Bei in dieser Form abgespeicherten Daten werden Metainformationen wie Umweltdaten und Messparameter mit den eigentlichen Messdaten gemischt. Aus diesem Grund ist die Gefahr von Datenverlusten groß, da ohne Information über die Datenstruktur die Informationen innerhalb einer solchen Datei leicht verloren gehen können. Die sogenannte „eXtended Markup Language“ (XML) ist eine Metasprache, welche sich zur Lösung dieser Probleme eignet. XML ist ein generelles Format zur formalen und abstrakten Definition von Sprachen. Die sogenannte „Dimensional Markup Language“ (DML)

[Sch02] ist eine Sprache, welche unter Nutzung von XML definiert wurde. DML wurde als spezielles Datenformat für Messdaten von Koordinatenmessmaschinen entworfen. DML wird in dieser Arbeit als Transferformat für Vorwissen und als Endformat für Messdaten der NCMM genutzt. Vorteile von DML sind:

1. Informationen (wie Messdaten) und Metainformation (wie Messparameter, Umweltparameter) werden zusammen gespeichert. Die Gefahr von Datenverlust durch falsche oder undokumentierte Messungen wird minimiert und die Datenstabilität erhöht.

2. Informationen und Metainformationen werden zusammen abgespeichert, aber dabei nicht vermischt. Sie können im Nachhinein leicht wieder voneinander getrennt werden.

3. DML ist ein offenes Format.

4. DML kann durch den Benutzer leicht gelesen und mit einem gewöhnlichen HTML-Browser dargestellt werden.

Zur Nutzung von DML wurden ein Konverter und ein Parser für Messdaten in Matlab implementiert. Der Konverter und Parser nutzen jeweils eine rekursive Funktion zum Parsen der Eingabedaten und schreiben die jeweilige Ausgabe als valides DML 2.0 in eine ASCII-Datei. Der Import von DML-Dateien kann leicht durch die Nutzung verschiedener frei zugänglicher XML-Bibliotheken erfolgen. Das folgende Quellcode-Beispiel zeigt die Beschreibung eines Punktes und einer Geraden in DML.

```
<feature_list>
  <feature  id = "1" name = "POINT">
    <point_feature  point_type = "POINT">
      <point_feature_actual  reporting_transform = "0"
         coordinate_type = "CARTESIAN">
        <point  x = "83.26" y = "58.05" z = "0.0"/>
      </point_feature_actual>
    </point_feature>
  </feature>
  <feature  id = "2" name = "LINE">
    <line_feature >
      <line_feature_actual  reporting_transform = "0"
         coordinate_type = "CARTESIAN">
        <point  x = "137.77" y = "37.50" z = "0.0"/>
        <vector  i = "0.0" j = "1.0" k = "0.0"/>
        <length>
          103.88
        </length>
      </line_feature_actual>
```

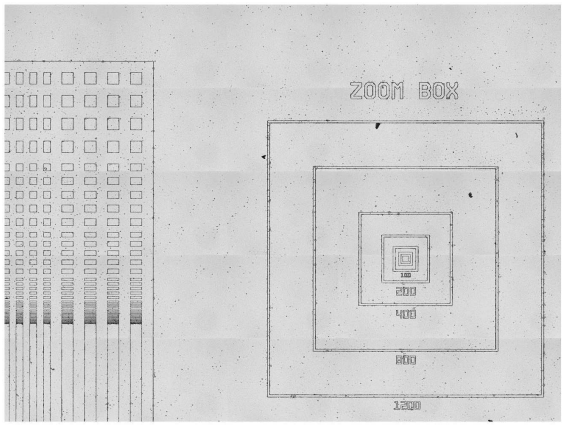


Abbildung 4.1: Ein aus 5 x 5 Einzelbildern zusammengesetztes Gesamtbild.

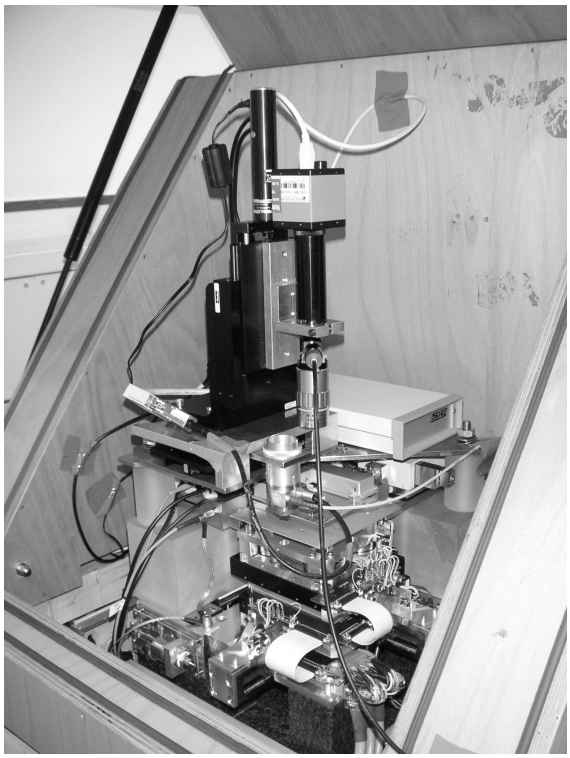


Abbildung 4.2: NCMM mit Mehrsensorsystem.

```
    </line_feature>
  </feature>
</feature_list>
```

4.3 Konstruktion eines Mehrsensorsystems

Die Nachteile von Rasterkraftmikroskopen im Hinblick auf die Messgeschwindigkeit, sowie die Notwendigkeit einer Kombination von Rasterkraftmikroskopen mit optischen Messverfahren wurde bereits in vorherigen Abschnitten erläutert. Die Abbildungsqualität der vorhandenen Beobachtungsoptik der NCMM erwies sich als nicht ausreichend für die Nutzung als Messoptik. Aus diesem Grund wurde ein Mehrsensorsystem für die NCMM konstruiert und umgesetzt. Bei der Konstruktion ergaben sich verschiedene spezifische Probleme, die gelöst werden mussten. Die Bauraumbeschränkungen und die relativ großen Abmaße des Rasterkraftmikroskops führten zur Umsetzung eines automatischen Sensorwechselsystems. Dabei wird zur Messung mit dem optischen Sensor das Rasterkraftmikroskop mittels einer Präzisionslinearführung (Physik Instrumente M-683.2U4) aus dem Strahlengang entfernt. Nach erfolgter optischer Messung wird das Rasterkraftmikroskop an die alte Position bewegt. Die Präzisionslinearführung ist stromlos haltend, das heißt sie kann zur Verringerung der thermischen Verlustleitung stromlos geschaltet werden. Die Sensorauflösung des optischen Positionssensors, sowie die unidirektionale Wiederholbarkeit der Linearführung betragen 100 nm sowie 200 nm. Bei dem Long-Distance-Objektiv der Messoptik

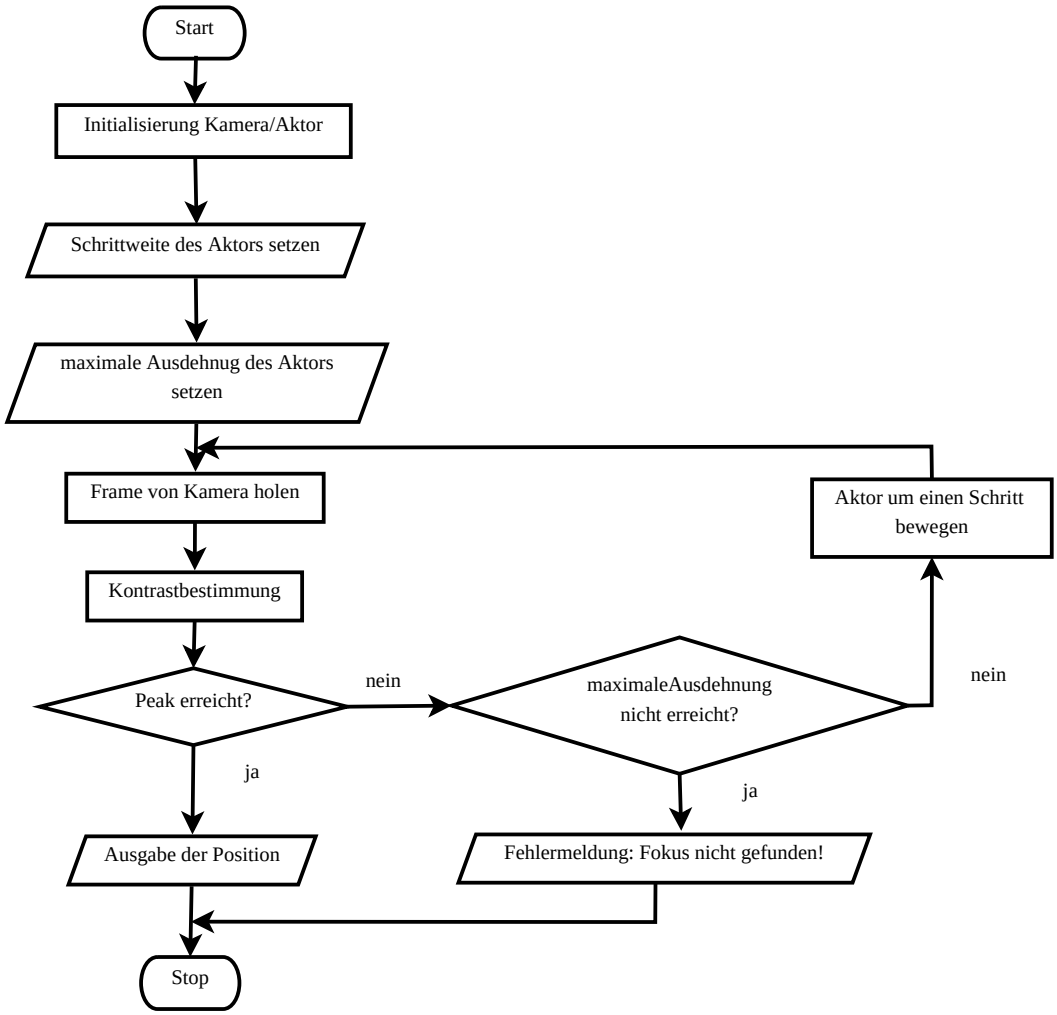


Abbildung 4.3: Programmablaufplan für die automatische Annäherung durch Autofokus.

handelt es sich um ein Mitutoyo M PLAN APO mit zehnfacher Vergrößerung und einem Arbeitsabstand von $30\,\mathrm{mm}$. Neben der Nutzung von Vorwissen, welches von einem externen Gerät generiert wurde, kann das Vorwissen ebenfalls durch Einsatz der Messoptik der NCMM generiert werden. Aufgrund der hohen Positionsauflösung der NCMM ist es nach einer Kalibrierung der Messoptik möglich Einzelbilder ohne spezielle Stitchingalgorithmen direkt aneinander zu fügen. Das zusammengesetzte Gesamtbild (siehe Abbildung 4.1) kann nach der Extraktion der Bezüge und der Messelemente zur Generierung eines Messplanes genutzt werden. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass bei bekanntem, kalibriertem Versatz zwischen Messoptik und AFM-Sensor keine Notwendigkeit zur Bestimmung der Ausrichtung und Lage der Probe auf dem Messtisch besteht. Der Z-Fokus ist durch eine weitere Linearführung motorisiert, was die Implementierung von Autofokus-Algorithmen zur Grobantastung der Messoberfläche möglich macht. Die Messoptik ist mit einer koaxialen Auflichtbeleuchtung versehen. Dabei wird das Licht einer Kaltlichtquelle über einen Strahlteiler in den optischen Strahlengang eingekoppelt.

4.4 Automatische Z-Annäherung durch Autofokus

Es werden zwei Methoden zur Bestimmung des optischen Fokus untersucht. Die erste Methode wertet zum Auffinden des Fokus das Verhältnis zwischen tiefen und hohen Frequenzen mit Hilfe eines FFT-Algorithmus aus. Die zweite Methode bestimmt den Fokus auf Basis einer Kontrastmessung. Es zeigt sich, dass die zweite Methode in der Praxis robuster und weniger rechenintensiv ist. Abbildung 4.3 erläutert die Implementierung der zweiten Methode anhand eines Programmablaufplans. Durch die Implementierung eines Autofokusverfahrens auf Basis einer Kontrastmessung kann man mit Hilfe des neuen optischen Mikroskops der NCMM die Höhe der Strukturen der Messoberfläche bis auf wenige Mikrometer genau bestimmen. Die Unsicherheit einer solchen Messung ist stark abhängig von den spezifischen Oberflächeneigenschaften des Messobjekts. Auf Basis der gewonnen Höheninformationen kann später der AFM-Sensor sicher an die Messoberfläche angenähert werden. Eine Kollision der Optik mit der Probenoberfläche ist selbst bei Fehleingaben durch die Nutzung eines Long-Distance-Mikroskopobjektivs nicht möglich. Durch Einsatz von Bildregistrierungsalgorithmen wird das Bezugskoordinatensystem (z.B. Marker oder andere geeignete Oberflächenstrukturen) optisch erkannt und gemessen.

4.5 Auffinden von Regions of Interest mit Hilfe von Markern

Vor dem Beginn einer vorwissensbasierten AFM-Messung muss die Position des Bezugskoordinatensystems anhand von Markern optisch bestimmt werden. Hierzu wird ein zweistufiger Algorithmus verwendet. In einer ersten Stufe wird eine Segmentierung der Bilddaten des Mikroskopbildes durchgeführt. In der zweiten Stufe wird eine Bildregistrierung der Marker durchgeführt, d.h. die Markerstrukturen des Messplans werden mit den aktuellen Bilddaten der Messoptik in Übereinstimmung gebracht.

Segmentierung von Mikroskopbildern. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei verschiedene Segmentierungsalgorithmen für den Zweck der Segmentierung von Mikroskopbildern untersucht. Der erste Algorithmus ist ein einfacher kantenbasierter Segmentierungsalgorithmus. Ein Sobel-Kantendetektor wird auf die Mikroskopbilder angewendet (siehe Abbildung 4.4a). Danach werden Lücken in den Kanten durch einen Dilatationsschritt (siehe Abbildung 4.4c) geschlossen. Die Flächen innerhalb der geschlossenen Konturen werden gefüllt (siehe Abbildung 4.4d) und als Bildobjekte erkannt. Der zweite Algorithmus [GWE04] basiert auf der Wasserscheiden-Transformation. Das Originalbild (siehe Abb. 4.5 a) wird binarisiert. Eine Distanztransformation des Komplements des Binärbildes wird berechnet (siehe Abb. 4.5 b). Die Wasserscheidentransformation wird auf die negierten Werte der Distanztransformation angewendet (siehe Abb. 4.5 c). Die Segmentierung wird durch eine logische Verknüpfung der extrahierten Wasserscheiden und des Binärbildes und einer nachfolgenden Erkennung der geschlossenen Konturen beendet (siehe Abb. 4.5 d). Die Untersuchung zeigt, dass der zweite Algorithmus bessere Ergebnisse liefert. In der Praxis zeigt sich, dass eine alleinige Segmentierung nicht bei allen Markerstrukturen ausreicht.

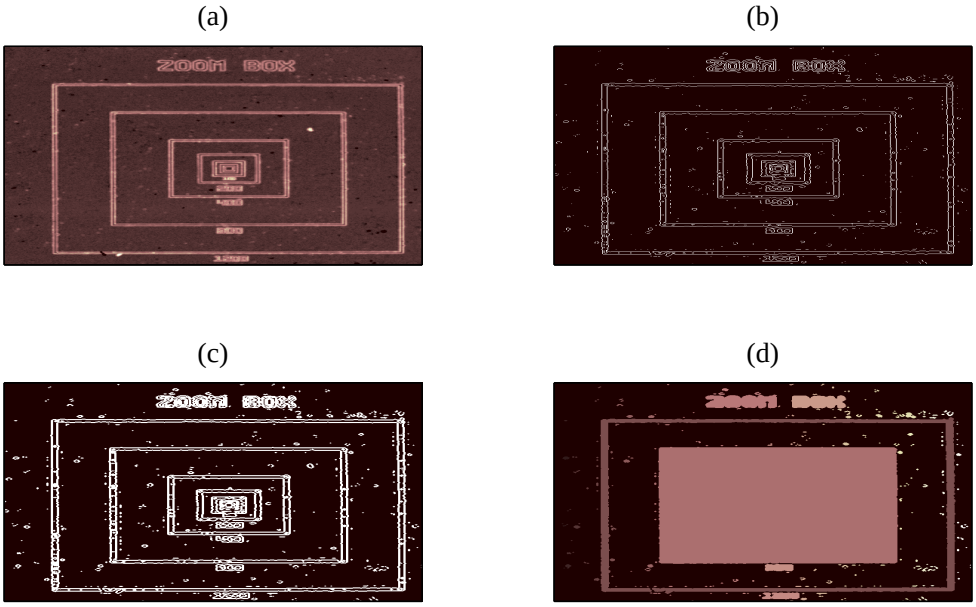


Abbildung 4.4: Der erste Segmentierungsalgorithmus: (a) Originalbild (Bildgröße: ca. $1{,}2 \times 1{,}2\,\mathrm{mm}$) (b) nach Anwendung des Sobel-Kantendetektors (c) nach einem Dilatationsschritt (d) segmentiertes Bild.

Die Markerstrukturen werden in zwei Kategorien, geschlossene Marker und offene Marker, eingeteilt (siehe Abbildung 4.6). Die geschlossenen Marker bilden eine einzige Struktur, die durch die Segmentierung als ein einzelnes Objekt erfasst werden kann. Die offenen Marker bestehen aus einer Anordnung von kleineren Unterstrukturen und werden somit nicht als ein einziges Objekt erfasst. Dazu ist zur Segmentierung von offenen Markern eine Clusteranalyse notwendig. Zu diesem Zweck wird ein Standardclusteralgorithmus, der k-Means-Algorithmus [Llo82], zur Clusterung der Objektdaten verwendet. Nach der Segmentierung und dem Clustern der Bildobjekte kann nun die Bildregistrierung durchgeführt werden.

Rotations- und skaleninvariante Bildregistrierung. Das Ziel der Bildregistrierung ist die Bestimmung der Parameter des Transformationsmodells zwischen dem Marker im aktuellen Mikroskopbild und dem Vergleichsmarker im Messplan. Nach Bestimmung des Transformationsmodells können das Teilkoordinatensystem des Messplans, gegeben durch den Marker, sowie die Messelemente innerhalb des Koordinatensystems auf die aktuelle Lage der Probe projiziert werden. Bei dem vorliegenden Problem handelt es sich um eine affine Transformation, das heißt sie beinhaltet die Möglichkeit einer Rotation um die Z-Achse, einer lateralen Translation und einer Skalierung. Die Skalierung wird durch eine Kalibrierung der Kamera ausgeschlossen.

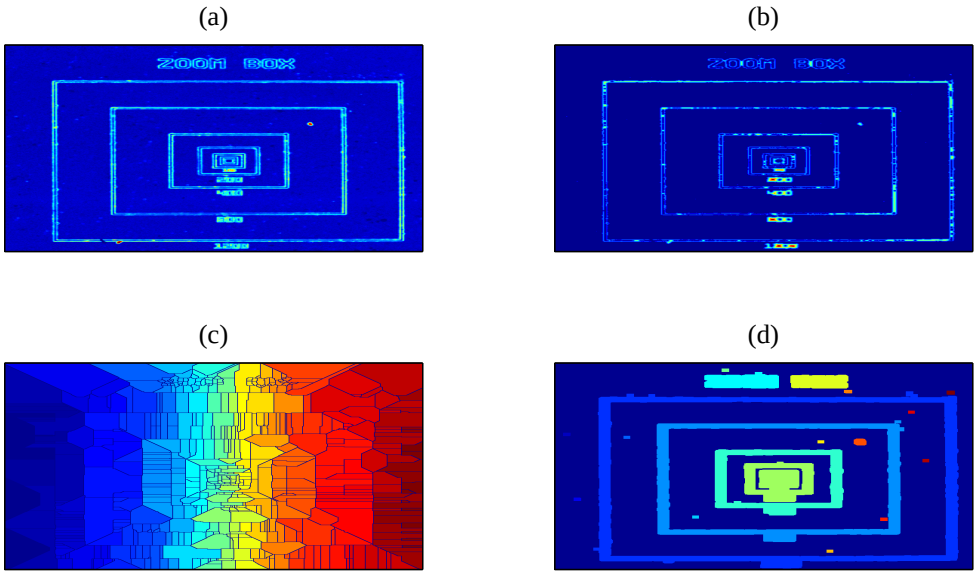


Abbildung 4.5: Der zweite Segmentierungsalgorithmus: (a) Originalbild (Bildgröße: ca. $1{,}2 \times 1{,}2\,\mathrm{mm}$) (b) Distanztransformation des Komplements des Binärbilds des Originalbilds (c) Wasserscheidentransformation der negierten Distanztransformation (d) segmentiertes Bild nach Löschung der überflüssigen Wassenscheiden.

Es ergibt sich folgende Gleichung zur Beschreibung der Transformation:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} cos\theta & -sin\theta \\ sin\theta & cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$$

Ein Kreuzkorrelationsalgorithmus kann nicht zur Bestimmung dieser affinen Transformation genutzt werden, da eine Kreuzkorrelation nicht rotationsinvariant ist. Das Signal-Rausch-Verhältnis der Kreuzkorrelationmethode sinkt bei einer Skalendifferenz von nur 2% oder einer Verdrehung von $3{,}5°$ von 30dB auf 3dB [Cas77]. Für die Lösung des Registrierungsproblems wird somit ein rotations- und skaleninvarianter Registrierungsalgorithmus benötigt. Innerhalb dieser Arbeit werden ein flächenbasierter Bildregistrierungsalgorithmus, die Fourier-Mellin-Transformation, und ein merkmalsbasierter Bildregistrierungsalgorithmus, der Iterative-Closest-Point-Algorithmus, eingesetzt.

Die Fourier-Mellin-Transformation, sowie von ihr abgeleitete Algorithmen, wurden in der Vergangenheit zur Lösung vieler Bildregistrierungsaufgaben wie zum Beispiel der Erkennung von Fingerabdrücken [ZOW06] und der Registrierung von medizinischen Bilddaten [CDD94] genutzt. Der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus basiert auf einer weiteren Implementierung der Fourier-Mellin-Transformation [RC96]. In die Fourier-Mellin-Transformation gehen wie bei der Kreuzkorrelation alle Bildpunkte beider zu registrierenden Bilder in den Merkmalsraum ein. Als Ähnlichkeitsmaß wird, wie bei der Kreuzkorrelation, die Korrelation der Bildpunkte untereinander ge-

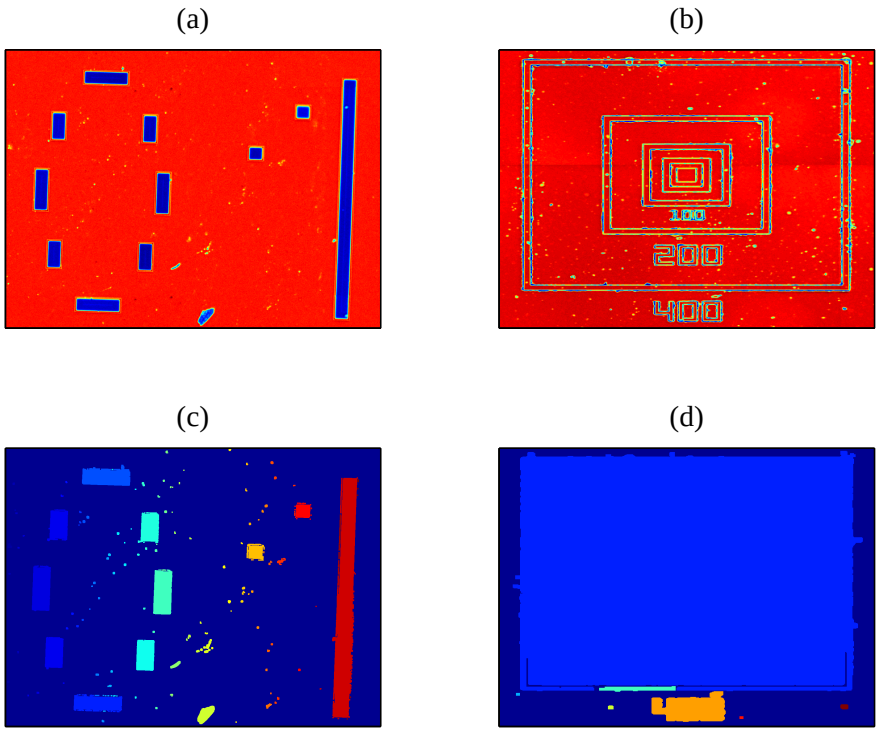


Abbildung 4.6: Vergleich geschlossene und offene Marker: (a) Marker von Nanofiltrationsmembran (b) Marker von VLSI-Standard (c) Marker der Nanofiltrationsmembran segmentiert (d) Marker des VLSI-Standards segmentiert.

nutzt. Zur Identifikation aller drei Transformationsparameter (θ, t_x und t_y) müssen, im Gegensatz zur Kreuzkorrelation, drei Phasenkorrelationen durchgeführt werden. Grundprinzip der Bildregistrierung mittels der Fourier-Mellin-Transformation ist, den Unterschied zwischen zwei Bildern in Skalierung und Orientierung als eine translatorische Verschiebung in einem transformierten Raum zu beschreiben. Diese translatorische Verschiebung wird durch Phasenkorrelation bestimmt. Die Fourier-Mellin-Transformation (siehe Abbildung 4.7) ist wie folgt implementiert:

1. Ausgangspunkt ist ein Objekt aus dem segmentierten Originalbild $I\,(x,y)$
2. Anwendung der Fourier-Transformation
3. Berechnung des Amplitudenspektrums der Fourier-Transformierten $|F\,(\omega_x,\omega_y)|$
4. Transformation des Amplitudenspektrums in Polarkoordinaten $F\,(r,\phi)$
5. Logarithmische Skalierung der Radius-Achse $F(e^{ln(r)},\phi)$
6. Anwendung einer weiteren Fourier-Transformation $M\,\left(\omega_{ln(r)},\omega_\phi\right)$

Nach der Bestimmung und Entfernung der Rotations- und Skalendifferenzen zwischen den Bildern wird nun mittels einer weiteren Phasenkorrelation die translatorische Verschiebung zwischen

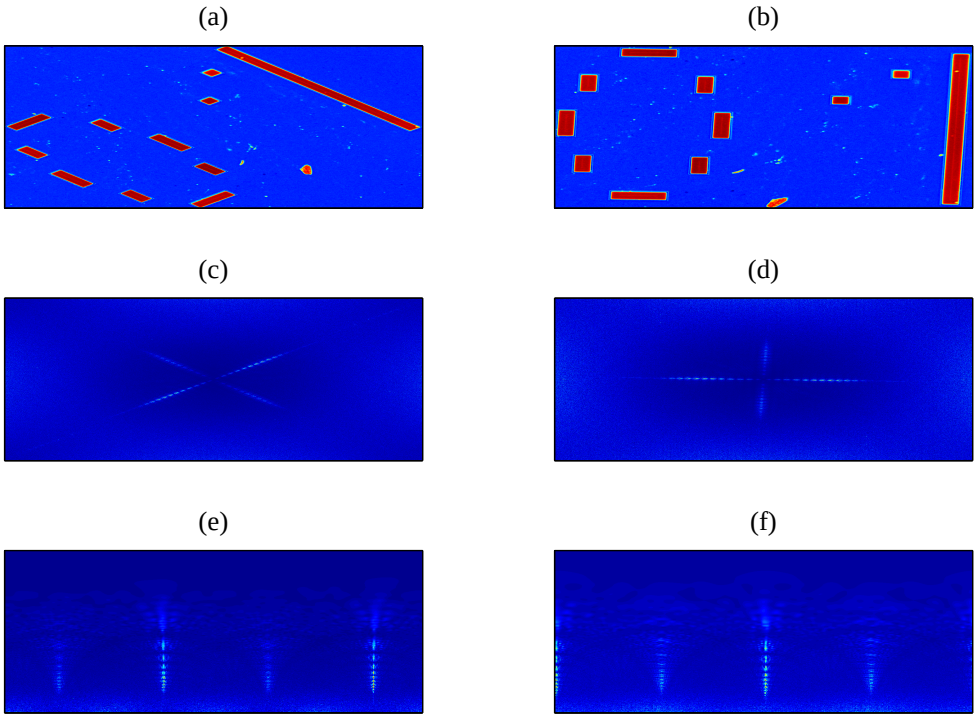


Abbildung 4.7: Bildregistrierung mittels Fourier-Mellin-Transformation: (a) Um 45° gedrehtes Originalbild (b) Originalbild (c) Amplitudenspektrum von Bild a (d) Amplitudenspektrum von Bild b (e) Log-Polar-transformiertes Amplitudenspektrum von Bild a (f) Log-Polar-transformiertes Amplitudenspektrum von Bild b.

den beiden Bildern bestimmt. Es gibt einige Beschränkungen für die Nutzung des Algorithmus. Der Algorithmus kann nicht ohne einen vorherigen Segmentierungsschritt angewendet werden, da bei der Anwesenheit von mehreren Objekten in einem Bild die spezifischen Muster der Objekte während der Transformation verschmelzen. Eine vorherige Segmentierung ist ebenfalls deutlich effizienter, weil der Algorithmus nur auf einen Teil des Bildes angewendet wird. Durch einen vorherigen Segmentierungsschritt ist es möglich, eine Vorselektion der Objekte auf Basis bestimmter Parameter wie Fläche, Breite und Höhe durchzuführen und somit die Laufzeit zu reduzieren.

Für die Registrierung von Daten unterschiedlicher Sensoren, beispielsweise den Bilddaten eines Auflichtmikroskops mit den 3D-Messdaten eines Rasterkraftmikroskops, sind flächenbasierte Algorithmen aufgrund fehlender Korrelation nicht geeignet. Im Gegensatz zu den meist einstufigen, flächenbasierten Bildregistrierungsalgorithmen sind merkmalsbasierte Bildregistrierungsalgorithmen in mehrere Stufen unterteilt (siehe Stand der Technik - Abschnitt 2.7.2). Der Prozess der Bildregistrierung ist in Merkmalsdetektion, Merkmalsabgleich, Bestimmung des Transformationmodells und Transformation des Bildes unterteilt. Es ergeben sich für die Bildregistrierung von Markern in einem realen Szenario spezifische Eigenschaften. Durch die Arbeit im Reinraum und die Anwendung extrem reproduzierbarer Fertigungsprozesse, zum Beispiel der Lithographie, sind Ver-

schmutzungen der Messoberfläche und Bildstörungen sehr selten. Optische Messparameter, wie beispielsweise die Beleuchtung, können sehr gut kontrolliert werden. Die für die Bildverarbeitung idealen Bedingungen wirken sich sehr positiv auf die Reproduzierbarkeit der Merkmalsextraktion aus. Problematisch erweist sich jedoch der Merkmalsabgleich. Bei der Bildregistrierung von Markern ist bei jedem Werkstück einer Serie die Umgebung um die Merkmalspunkte anders, nur die Form der Marker bleibt per Definition gleich. Das heißt es ist nicht möglich die Umgebung der extrahierten Merkmalspunkte zum Abgleich der Merkmale zu nutzen. Ohne die Möglichkeit zum Merkmalsabgleich und die Herstellung korrespondierender Punktpaare ist die Anwendung von Standardmethoden zur Bestimmung des Transformationsmodells nicht möglich. Mit dem Iterative-Closest-Point-Algorithmus [BM92, Zha92] kann das Korrespondenzproblem gelöst werden. Indem nicht die Umgebung der Merkmalspunkte abgeglichen wird, sondern die Form der Punktwolken der Merkmalsdatensätze zum Abgleich genutzt wird, kann ein Transformationsmodell gewonnen werden. Der ICP-Algorithmus ist aufgrund seiner Einfachheit und Performance attraktiv. Eine spezielle Variation des ICP-Algorithmus, die LM-ICP [Fit03], benutzt einen nichtlinearen Standardoptimierungsalgorithmus, den Levenberg-Marquardt(-LM)-Algorithmus [Lev44, Mar63], als Basis. Neben der Anwendung des LM-Algorithmus wird im Rahmen der LM-ICP auch eine effiziente Implementierung der Suche des nächsten Nachbarn durch eine Distanztransformation aufgezeigt. Der LM-ICP-Algorithmus dient als Grundlage für die weiteren Betrachtungen. Als Merkmale werden in dieser Arbeit Kanten- beziehungsweise Eckpunkte benutzt, die mittels eines Eckendetektors [HY04] beziehungsweise durch einen Canny-Kantendetektor [Can86] extrahiert werden. Zur Berechnung des Ähnlichkeitsmaßes wird im Rahmen der LM-ICP die Methode der kleinsten Quadrate angewendet. Die Vorarbeiten zeigen, dass sich die Anwendung eines robusten Abstandsmaßes (z.B. Huber- oder Lorentzian-Kernel) im Vergleich zur euklidischen Distanz positiv auf die Konvergenz des Algorithmus auswirkt. Der modifizierte LM-ICP-Algorithmus (siehe Abbildung 4.8) läuft in folgenden Schritten ab:

1. Segmentierung der Bilddaten und Clustern der Bildobjekte.
2. Merkmalsextraktion mittels des Eckendetektors beziehungsweise des Canny-Kantendetektors.
3. Berechnung der Distanztransformation der Punktwolke des Suchbildes sowie ihrer partiellen Ableitungen nach x und y.
4. Ermittlung der Parameter der affinen Transformation mittels nichtlinearer Optimierung.

Insbesondere die mathematische Beschreibung des Fehlermaßes und die Ableitung des Optimierungsalgorithmus benötigt eine nähere Erläuterung. *Fitzgibbon* definiert zwei Mengen von Punkten im $\Re_n$, welche als Modell und Daten bezeichnet werden. Die Elemente dieser Mengen werden angegeben als $\{m_i\}_{i=1}^{N_m}$ und $\{d_i\}_{i=1}^{N_m}$. Basierend auf dem Transformationsmodell:

$$T_{2D}\left(a;x\right) = T\left(\theta,t_x,t_y;x\right) = \begin{pmatrix} cos\theta & -sin\theta \\ sin\theta & cos\theta \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}$$

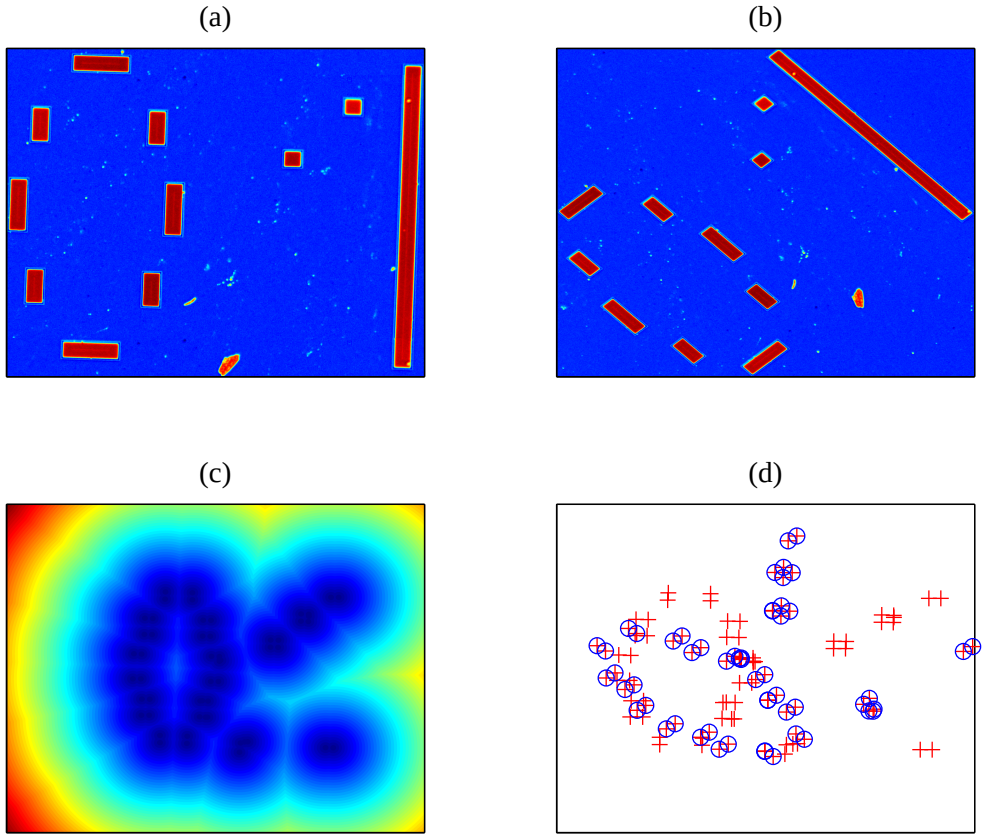


Abbildung 4.8: Bildregistrierung mittels ICP: (a) Originalbild (b) Um 45° gedrehtes Originalbild (c) Distanztransformation der Ecken des Originalbildes (d) Mittels Eckendetektor extrahierte Punkte beider Bilder (Zentroid abgezogen).

mit $a = [\theta, t_x, t_y]$, $x \in \Re_2$ und der Fehlerfunktion:

$$\epsilon^2 (|x|) = \|x\|^2$$

wird der Fehler des Transformationsmodells als:

$$E(a) = \sum_{i=1}^{N_d} w_i \min_j \epsilon^2 (|m_j - T(a; d_i)|) \tag{4.1}$$

definiert. Der Fehler des Transformationsmodells wird aus der Summe der Quadrate der Abstände zwischen den transformatierten Datenpunkten und dem nächstliegenden Modellpunkt berechnet. Für jeden transformierten Datenpunkt muss der nächstliegende Modellpunkt ermittelt werden. Dieses Problem ist in der Informatik unter der Bezeichung „Suche nach dem nächsten Nachbarn“ bekannt. Die Komplexität der Suche nach dem nächsten Nachbarn ist quadratisch: $O(n^2)$ (bei identischer Punktanzahl n in beiden Punktmengen). Die Suche muss bei jeder Iteration des Optimierungsalgorithmus wiederholt werden, was die Komplexität um den Faktor der durchschnittlichen Anzahl an Iterationen bis zum Iterationsabbruch erhöht. *Fitzgibbon* löst das Problem der

Suche nach dem nächsten Nachbarn auf eine elegante Weise mit Hilfe einer Distanztransformation. Die euklidische Distanztransformation ist für eine Punktmenge $\mathfrak{M} = \{m_j\}_{j=1}^{N_m}$ definiert als:

$$D_E(x) = \min_j \|m_j - x\| \tag{4.2}$$

Auf Basis der euklidischen Distanztransformation kann jedes beliebige andere Abstandsmaß D berechnet werden. Über das berechnete Abstandsmaß kann der Fehler des Transformationmodells (Gl. 4.1) wie folgt definiert werden:

$$E(a) = \sum_{i=1}^{N_d} w_i D(T(a; d_i))$$

Auf Basis dieser Formulierung des Modellfehlers kann der Gradientenvektor für die Optimierung der Transformationsparameter a als:

$$\nabla_a E(a) = \sum_{i=1}^{N_d} w_i \nabla_a T(a; d_i) \cdot \nabla_x D(T(a; d_i))$$

beschrieben werden. Durch die Nutzung einer Distanztransformation zur effizienten Implementierung der Suche nach dem nächsten Nachbarn ist die LM-ICP anderen ICP-Varianten deutlich überlegen. Die Interpolation der durch die Distanztransformation generierten Distanzkarte, welche einmal vor Beginn der Optimierung erzeugt wird, ist weniger rechnenintensiv als die wiederholte Durchführung der Suche nach dem nächsten Nachbarn innerhalb eines jeden Optimierungsschrittes. Der ursprüngliche LM-ICP-Algorithmus konnte in vorherigen Arbeiten keine vollständige Konvergenz über den gesamten Vollkreis erreichen [Fit03]. Ein erste Ansatzpunkt zur Verbesserung des Konvergenzverhaltens ist die Auswahl von geeigneten Methoden zur Merkmalsextraktion beziehungsweise die Auswahl von geeigneten Merkmalen. In einer vergleichenden Untersuchung zeigte sich, dass die Verwendung von Kantenpunkten, welche mit einem Canny-Kantendetektor extrahiert wurden, keinen Vorteil gegenüber der Verwendung von Eckpunkten, welche mittels des Eckendetektors extrahiert wurden, hat. Allerdings generiert ein Canny-Kantendetektor eine deutlich größere Punktanzahl, was zu einer höheren Laufzeit der nichtlinearen Optimierung führt. Der Einsatz der convexen Hülle zur Reduktion der Punktanzahl und Rechenzeit erweist sich als nicht geeignet, da die convexe Hülle instabil ist und somit zu mehr Fehlerkennungen führt. Aufgrund dieser Ergebnisse wird zur Merkmalsextraktion allein der Eckendetektor verwendet. Eine zweiter Ansatzpunkt zur Optimierung des Konvergenzverhaltens ist die Untersuchung geeigneter Methoden zur Gewinnung optimaler Startparameter für die nichtlineare Optimierung. Die Resultate des unmodifizierten LM-ICP Algorithmus zeigen eine Abhängigkeit von den Startparametern des Optimierungsprozesses. Um eine vollständige Konvergenz über den gesamte Vollkreis zu erreichen, ist es notwendig die Optimierung mit gleichmäßig über den Vollkreis verteilten Startwinkeln, sogenannten „Seeds“, zu starten. Als Referenzmethode zum Vergleich mit der ICP dient ein Brute-Force-Ansatz, bei dem die zentrierten Punktwolken mit einer Auflösung von einem Grad im Bereich von 0 bis 359 Grad gedreht werden und jeweils der Fehler des Modells berechnet

wird. Der Winkel mit dem niedrigsten Fehler gilt als bestes Modell. Diese Methode führt immer zum richtigen Ergebnis, ist allerdings extrem rechenintensiv, da immer der komplette Suchraum durchforstet werden muss. Es zeigt sich, dass für die Erreichung einer vollständigen Konvergenz über den gesamten Suchraum mit der ICP mindestens acht Seeds notwendig sind (siehe Abbildung 4.10). Der Ansatz über eine Erhöhung der Seeds bis auf acht die Konvergenz über den gesamten Vollkreis zu erreichen, ist sehr rechenintensiv. Aus diesem Grund wurde eine auf Hauptachsen beziehungsweise Momenten basierende Methode entwickelt, um einen Satz guter Startparameter für die Optimierung zu gewinnen. Besonders in der Registrierung von medizinischen Bildern werden Algorithmen, die Hauptachsen und Momente zur Registrierung einsetzen, verwendet [ABKC90]. Momenten-basierte Bildregistrierungsalgorithmen sind gegenüber anderen Verfahren relativ ungenau, allerdings sehr schnell und einfach zu implementieren [MV98]. Tatsächlich nutzt der LM-ICP-Algorithmus bereits das nullte Moment, den Zentriodvektor, zur Zentrierung der Punktwolken. Basierend auf einer Hauptkomponentenanalyse (PCA) der Punktwolken [Pea01] kann die Hauptkomponente (PC) mit dem höchsten Eigenwert zur Ermittlung der Orientierung einer Punktwolke genutzt werden (siehe Abbildung 4.9). Mit dieser Methode kann die Rotationsdifferenz zweier Punktwolken auf einfache Art und Weise aus den Hauptkomponenten errechnet werden. Allerdings ist der ermittelte Wert für die Rotationsdifferenz nicht eineindeutig, da das Vorzeichen der Hauptkomponenten unbekannt ist. Von den vier alternativen Werten für die Rotationsdifferenz wird der Wert mit dem geringsten Modellfehler als Startparameter für die Optimierung ausgewählt. Der so modifizierte LM-ICP-Algorithmus wird im Folgenden mit der Notation LM-ICP-PC abgekürzt. Zur Untersuchung der Genauigkeit und Performance der modifizierten Algorithmen werden der durchschnittliche Standardfehler der Optimierungsergebnisse (siehe Tabelle 4.2) und die durchschnittliche Anzahl von Iterationen bis Konvergenz (siehe Tabelle 4.1) genutzt. Die auf Basis der Hauptkomponenten gewonnenen Startparameter sind im Normalfall bereits eine sehr gute Approximation des zu gewinnenden Optimierungsergebnisses. Aus diesem Grund sind benötigt der LM-ICP-PC-Algorithmus nur ca. ein Fünftel soviele Iteration wie der LM-ICP Algorithmus mit acht Seeds. Beim Vergleich des durchschnittlichen Standardfehlers der unterschiedlichen Algorithmen zeigt sich, dass die verbesserte Performance des LM-ICP-PC-Algorithmus nicht zu Lasten der Genauigkeit geht. Auf Kosten einer Verdoppelung der Anzahl an Iterationen kann das Optimierungsergebnisse der LM-ICP-PC durch eine Ausreißerentfernung gefolgt von einer Reinitialisierung der Optimierung weiter verfeinert werden (siehe Tabelle 4.2). Diese Methode wird im Folgenden unter der Notation LM-ICP-PC refined geführt. Generell kann die Performance der Methoden durch die Benutzung eines Probenhalters stark verbessert werden. Durch die Benutzung eines Probenhalters ist es möglich enge Grenzen für die Optimierungsparameter zu setzen und somit den Suchraum stark zu verkleinern. Im Vergleich aller Algorithmen (Brute Force, LM-ICP mit 8 Seeds, LM-ICP-PC, LM-ICP-PC refined) auf Basis des durchschnittlichen Fehlers bei der Bestimmung der Rotationsdifferenz zeigt sich, dass der LM-ICP-PC-refined-Algorithmus die beste Resultate liefert (siehe Abb. 4.11). Der auf der Fourier-Mellin-Transformation basierende Algorithmus erweist sich in einer reinen Matlab-Implementierung der Algorithmen als der schnellste Algorithmus. Allerdings zeigt die Fourier-Mellin-Transformation eine hohe Abhängigkeit vom

Tabelle 4.1: Vergleich der verschiedenen Algorithmen basierend auf der durchschnittlichen Anzahl von Iterationen bis zur Konvergenz. Die durchschnittliche Anzahl von Iterationen wird für jeden Marker durch eine Registrierung mit einer rotierten Version seiner selbst im Bereich von 0° bis 355° in einem Interval von 5° berechnet.

Marker Index	1	2	3	4	5	6	7	Ratio
LM-ICP mit acht Seeds	139.5	134.1	131.9	138.7	138.9	140.5	142.5	1
LM-ICP PC	28.5	27.1	28.7	27.7	25.9	27.7	27.9	0.17
LM-ICP PC refined	53.4	52.4	53.4	55.3	48.4	53.2	54.9	0.34

Tabelle 4.2: Vergleich der verschiedenen Algorithmen basierend auf dem durchschnittlichen Standardfehler des Transformationsmodells (in Pixel) beim Erreichen der Konvergenz. Die Konfidenzintervalle wurden für ein Konfidenzniveau von 95 % berechnet. Der durchschnittliche Standardfehler beim Erreichen der Konvergenz wird für jeden Marker durch eine Registrierung mit einer rotierten Version seiner selbst im Bereich von 0° bis 355° in einem Interval von 5° berechnet.

Marker Index	LM-ICP mit 8 Seeds	LM-ICP PC	LM-ICP PC refined
1	4.01 ± 0.54	4.34 ± 0.48	2.76 ± 0.33
2	4.18 ± 0.64	4.55 ± 0.50	2.63 ± 0.40
3	3.75 ± 0.58	4.38 ± 0.60	3.04 ± 0.51
4	6.72 ± 0.51	6.79 ± 0.36	4.43 ± 0.43
5	2.79 ± 0.43	2.35 ± 0.26	1.73 ± 0.09
6	3.83 ± 0.60	3.92 ± 0.44	2.40 ± 0.34
7	7.36 ± 0.76	7.03 ± 0.67	4.49 ± 0.63

verwendeten Marker. Die Ergebnisse dieses Algorithmus sind deutlich schlechter als die der LM-ICP-Varianten. Die ICP-Algorithmen erweisen sich als robuster gegenüber Störungen, da sie im Gegensatz zur Fourier-Mellin-Transformation die Bildregistrierung auf Basis von abstraktere Größen, der Merkmale, durchführen. Auf Basis dieser Resultate erweist sich der LM-ICP-PC-refined-Algorithmus als die optimale Wahl unter allen getesteten Algorithmen.

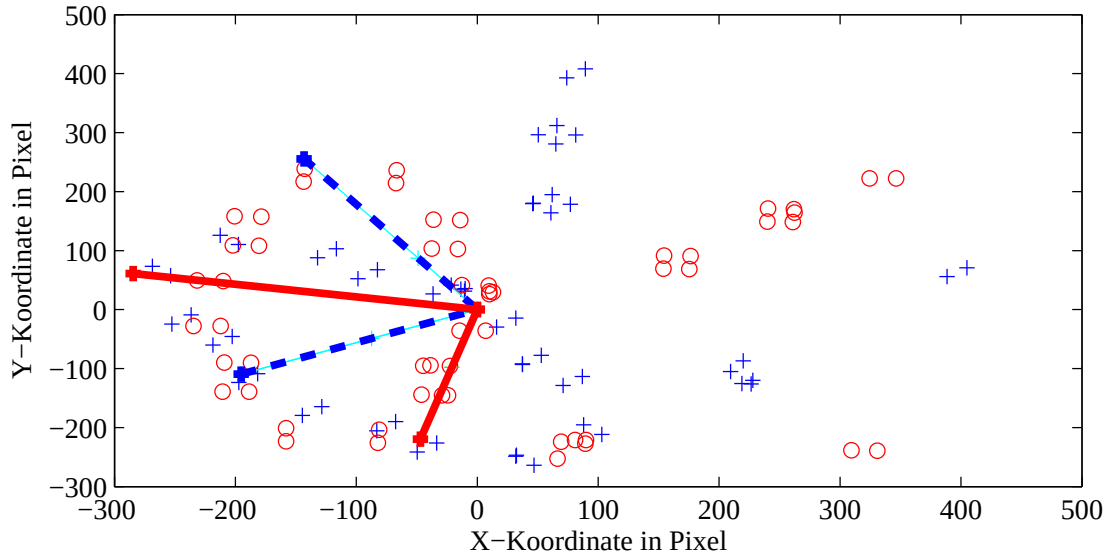


Abbildung 4.9: Zwei zentrierte Punktwolken mit eingezeichneten Hauptkomponenten.

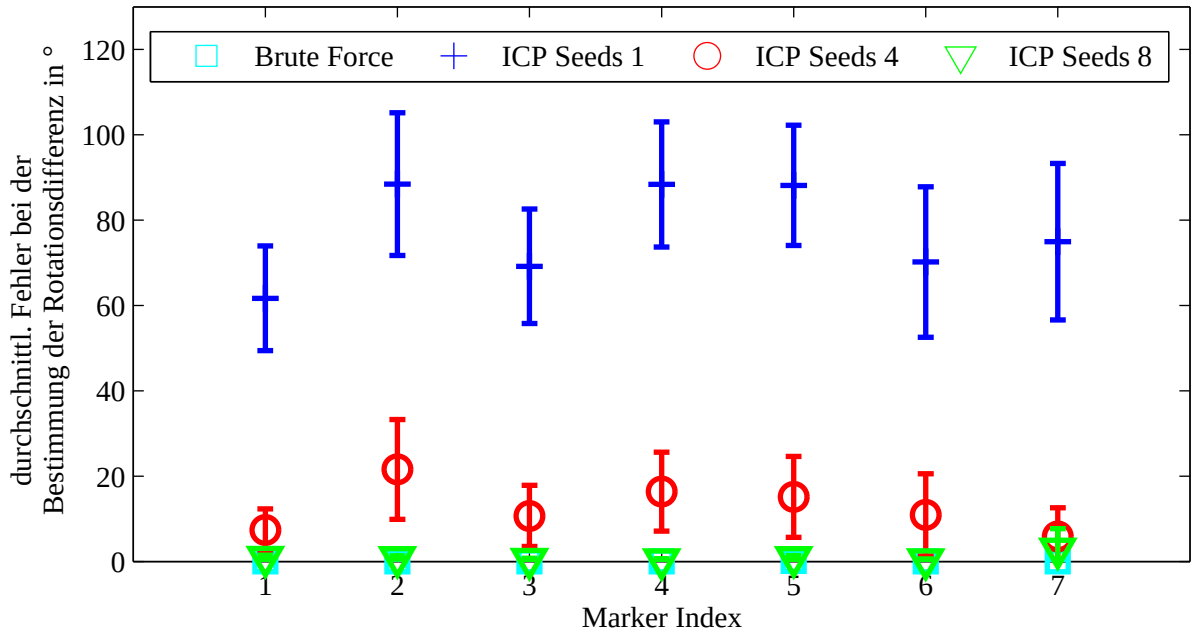


Abbildung 4.10: Vergleich des durchschnittlichen Fehlers bei der Bestimmung der Rotationsdifferenz zweier gegeneinander rotierter Bilder in Abhängigkeit der Anzahl der Seeds im Bereich von 0 bis 355 Grad mit einer Schrittweite von 5 Grad. Die Konfidenzintervalle wurden für ein Konfidenzniveau von 95 % berechnet.

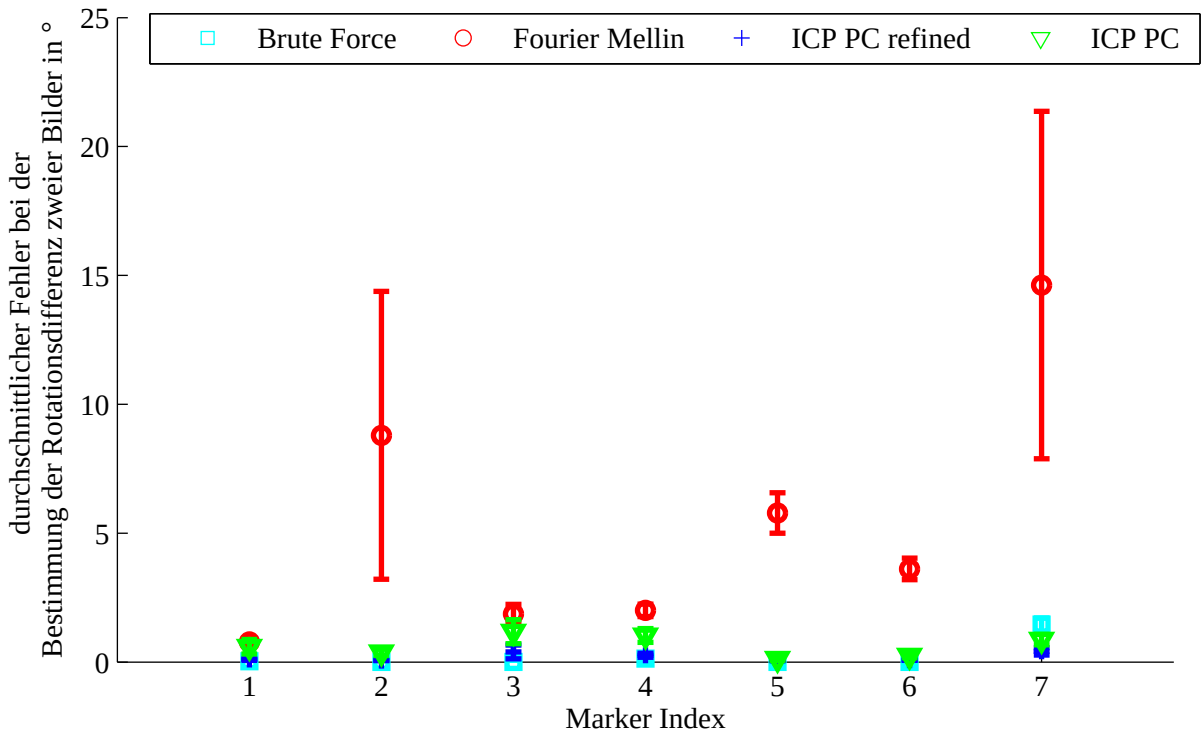


Abbildung 4.11: Vergleich des durchschnittlichen Fehlers bei der Bestimmung der Rotationsdifferenz zweier gegeneinander rotierter Bilder. Die Konfidenzintervalle wurden für ein Konfidenzniveau von 95 % berechnet.

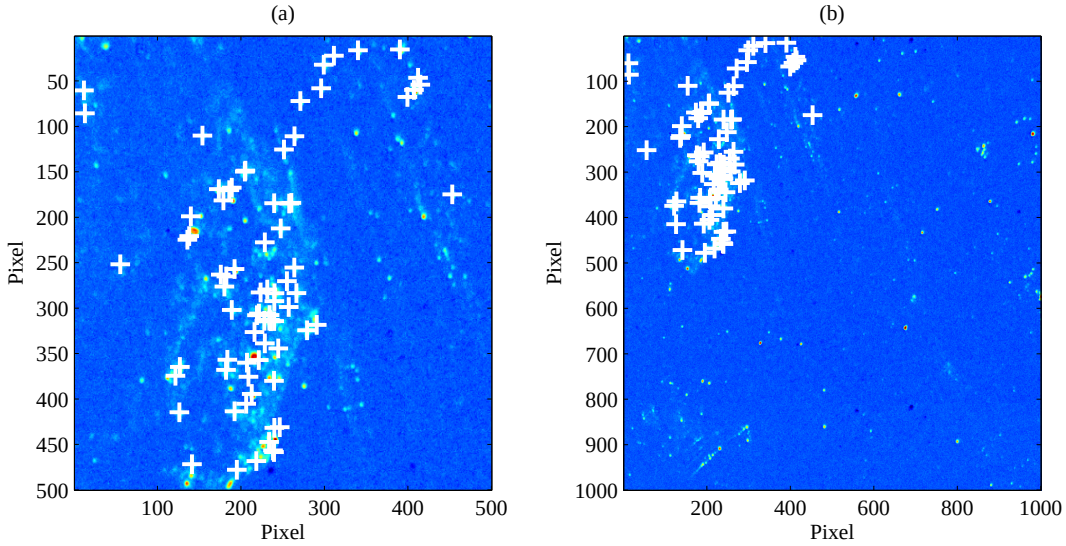


Abbildung 4.12: Abgleich eines Bildausschnitts (a) mit dem Gesamtbild (b).

4.6 Auffinden von Regions of Interest ohne Marker

Bei Proben ohne Marker und ohne markante Objekte, die sich für eine Segmentierung eignen, stellt sich erneut das Orientierungsproblem. Besonders für Rauheitsmessungen erscheint es wichtig, auch sehr glatte Proben mit nahezu stochastisch verteilten Höhenwerten registrieren zu können. Grundsätzlich können für die Problemlösung Korrelationsmethoden angewandt werden, welche allerdings keine Rotationsinvarianz besitzen. Bei den Recherchen und Untersuchungen für die markerbasierte Bildregistrierung (siehe Stand der Technik - Abschnitt 2.7.2) zeigt sich, dass der SIFT-Algorithmus [Low04, BL03] dieses Problem lösen kann. Eine auf Geschwindigkeit optimierte Weiterentwicklung von SIFT ist der SURF-Algorithmus [BTVG08]. SURF ist skalen- und rotationsinvariant. SURF eignet sich nicht zur Datenfusion von Datensätzen unterschiedlicher Sensoren (z.B. optisches Mikroskop und AFM). In dieser Arbeit wird eine Open-Source-Implementierung des SURF-Algorithmus verwendet [Eva09]. Der SURF-Algorithmus verläuft in folgenden Hauptschritten:

1. Extraktion und Lokalisation der Merkmalspunkte mittels einer Approximation der Determinante der Hesse-Matrix

2. Zuordnung einer reproduzierbaren Orientierung für jeden Merkmalspunkt

3. Berechnung der Deskriptor-Komponenten mittels Haar-Wavelets

Der Grund für die hohe Performance des SURF-Algorithmus ist die konsequente Anwendung eines Konzepts namens Integralbilder (engl.: integral images). Das Konzept der Integralbilder wurde populär durch *Viola und Jones* [VJ01]. Frühere Publikationen zum Thema Integralbilder lassen sich unter dem englischen Begriff „summed area table“ finden [Cro84].

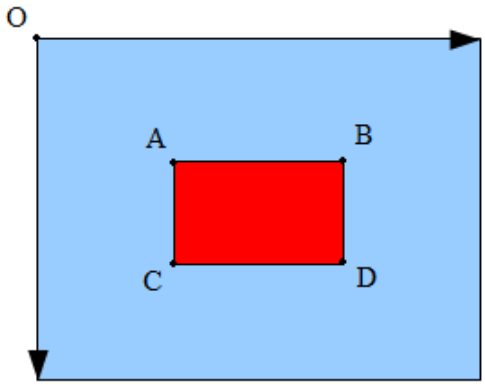


Abbildung 4.13: Flächenberechnung mittels Integralbildern.

Ein Integralbild ist wie folgt definiert [Eva09]:

$$I_{\sum}(x,y) = \sum_{i=0}^{i \leq x} \sum_{j=0}^{j \leq y} I(x,y)$$

Durch die Beschreibung als Integralbilder kann die Summe der Pixelwerte in einem Gebiet, welches durch die Punkte A, B, C, D begrenzt wird (siehe Abbildung 4.13), durch die Gleichung:

$$\sum = I_{\sum_A} + I_{\sum_D} - I_{\sum_C} - I_{\sum_B}$$

bestimmt werden. Durch den Einsatz von Integralbildern kann die Extraktion der Merkmalspunkte mittels der Determinanten der Hesse-Matrix effizient implementiert werden. Für einen Punkt $\mathbf{x} = (x,y)$ in einem Bild I ist die Hesse-Matrix $H(\mathbf{x},\sigma)$ in $\mathbf{x}$ auf einer Skala σ definiert als [BTVG08]:

$$H(\mathbf{x},\sigma) = \begin{bmatrix} I_{xx}(\mathbf{x},\sigma) & I_{xy}(\mathbf{x},\sigma) \\ I_{xy}(\mathbf{x},\sigma) & I_{yy}(\mathbf{x},\sigma) \end{bmatrix}$$

Dabei werden die partiellen Ableitungen $I_{xx}(\mathbf{x},\sigma)$, $I_{yy}(\mathbf{x},\sigma)$ und $I_{xy}(\mathbf{x},\sigma)$ des Bildes I aus der Faltung von I im Punkt *x* mit einem entsprechenden Gaußfilter $\frac{\partial^2}{\partial x^2} g(\sigma)$ erzeugt. Durch die Verwendung von Integralbildern in Kombination mit Box-Filtern (siehe Abb. 4.14) reduziert sie die rechentechnische Komplexität dramatisch. Für die Faltung mit einem 9 x 9 - Filter werden pro Bildpunkt 81 Array-Zugriffe und -operationen bei der Anwendung eines diskretisierten Gaußfilters benötigt. Bei Faltung mit einem Box-Filter werden hingegen nur 8 Array-Zugriffe und -operationen benötigt. Die Determinante der Hesse-Matrix muss bei der Verwendung von Box-Filtern (Ableitung von I repräsentiert durch D_{xx}, D_{yy} und D_{xy}) wie folgt angepasst werden:

$$\det(H_{approximiert}) = D_{xx}D_{yy} - (0.9D_{xy})$$

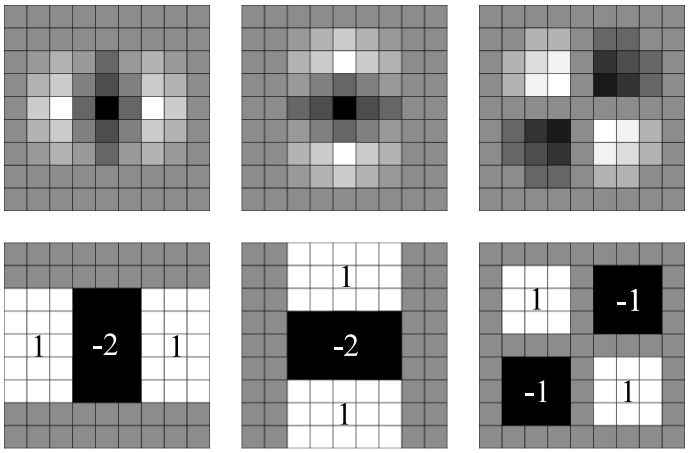


Abbildung 4.14: Approximation der Filterkerne: (oben) Diskretisierter Filterkern zur Bestimmung der zweiten Ableitung in x,y und xy (unten) Approximation durch Boxfilter.

Neben der effizienten Berechnung der Determinanten der Hesse-Matrix wird das Konzept der Integralbilder ebenfalls bei der Berechnung der Deskriptoren mittels Haar Wavelets verwendet. Nach der Extraktion der Merkmalspunkte und der Berechnung der skalen- und rotationsinvarianten Deskriptoren erfolgt der Merkmalsabgleich zwischen den Datensätzen der extrahierten Merkmalspunkte der beiden zu registrierenden Bilder (siehe Abbildung 4.12). Die so gewonnenen korrespondierenden Punktpaare werden zur Berechnung des Transformationsmodells genutzt. Aufgrund eines relativ hohen Anteils an Ausreißern ist die Methode der kleinsten Fehlerquadrate zur Bestimmung des Transformationsmodells nicht geeignet. Deshalb wird zur Berechnung des Transformationsmodells der RANSAC-Algorithmus eingesetzt [FB81]. Der RANSAC-Algorithmus verfolgt einen iterativen Ansatz. Innerhalb einer Schleife wird als erster Schritt ein Modell auf Basis einer minimalen Anzahl von zufällig ausgewählten Punktpaaren ermittelt. Beim vorliegenden Registrierungsproblem sind mindestens drei Punktpaare für die Bestimmung des Transformationsmodells notwendig. Nach der Bestimmung eines Modells auf Basis der drei zufällig ausgewählten Punktpaare wird mittels eines vordefinierten Ausreißermaßes die Zahl der validen Punktpaare für das jeweilige Modell im Gesamtdatensatz ermittelt. Das Modell und die zugehörige Zahl an validen Punktpaaren werden in einem sogenannten „Consensus-Set“ gespeichert. Diese Prozedur wird bis zur maximalen Iterationszahl wiederholt. Die maximale Zahl an Iterationen wird wie folgt definiert:

$$n = \frac{\log\left(1-p\right)}{\log\left(1-\left(1-\epsilon\right)^{s}\right)}$$

- p ... Wahrscheinlichkeit, das mindestens eine der zufälligen Auswahlen richtig ist
- ϵ ... Ausreißeranteil
- s ... Mindestanzahl von Punktpaaren zur Bestimmung des Transformationsmodells

Das Modell mit dem größten zugehörigen „Consensus-Set“ wird als bestes Modell ausgewählt.

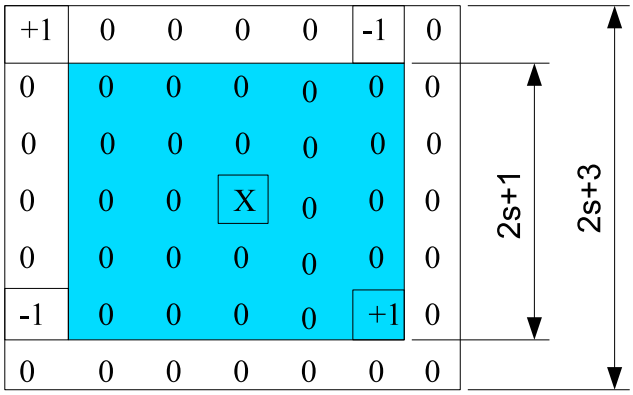
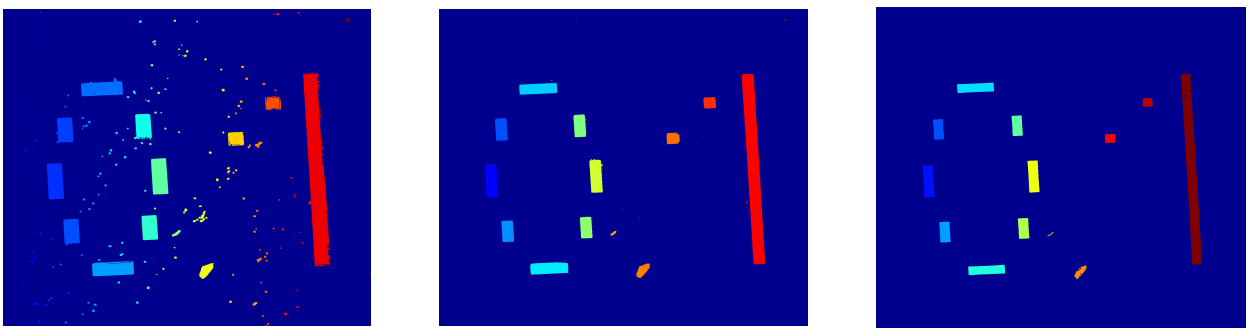


Abbildung 4.15: Faltungskern zur Berechnung der Summe der Intensitätswerte in einem $(2s+1 \times 2s+1)$-Fenster (blau) um den Punkt X (hier mit $s=2$).

4.7 Methoden zur Optimierung des Laufzeitverhaltens

Zur Optimierung des Laufzeitverhaltens der markerbasierten Bildregistrierungsalgorithmen aus Abschnitt 4.5 ist es notwendig die Algorithmen umfassend zu betrachten um mögliche Synergien zu identifizieren. Beispielsweise werden sowohl in der kantenbasierten Segmentierung als auch in der Merkmalsextraktion partielle Ableitungen der Bilddaten (I_x,I_y,I_{xy}) benötigt. Die Berechnung der partiellen Ableitungen ist relativ aufwendig und sollte nur einmal erfolgen oder gänzlich substituiert werden. Das Prinzip der Integralbilder (vgl. Abschnitt 4.6) läßt sich immer dort einsetzen, wo es notwendig ist flächenhafte Summationen beziehungsweise Integrationen der Bilddaten durchzuführen. Der Aufwand zur Erstellung eines Integralbildes ist immer da sinnvoll, wenn die gleiche Bilddaten mehrfach mit unterschiedlichen Filtern bearbeitet werden müssen, da bei jedem Filterdurchlauf durch den Einsatz von Integralbilder Einsparungen vorhanden sind. Nach diesen abstrakten Überlegungen wird nun speziell die Methode der LM-ICP-PC-refined optimiert.



(a) **(b)** **(c)**

Abbildung 4.16: Vergleich des Segmentierungsergebnisses: (a) kantenbasierte Segmentierung (b) Segmentierung mit Wasserscheidentransformation (c) Segmentierung mit adaptivem Schwellwert.

Im ersten Schritt wird die Optimierung der Segmentierung der Marker untersucht. Die Segmentierung der Marker auf Basis der Wasserscheidentransformation beziehungsweise die kantenbasierte Segmentierung ist rechnentechnisch relativ aufwendig. Aus diesem Grund wird für die Segmentierung eine Methode namens „Adaptive Thresholding“ (dt. adaptive Schwellwertverfahren) genutzt [BR07]. Diese Methode nutzt das Prinzip der Integralbilder zur Bestimmung eines lokalen Mittelwerts der Intensitätswerte. Während der Schwellwertoperation wird für jeden Pixel in einem quadratischen Fenster der lokale Mittelwert der Intensitätswerte berechnet. Die Berechnung der Fensterfunktion wird effizient durch die Faltung des Integralbildes mit einem speziellen Filterkern durchgeführt (siehe Abbildung 4.15). Aus Gründen der Symmetrie und zur Gewinnung einer eindeutigen Lokalisation wird dem Filterkern eine zusätzliche Spalten sowie eine zusätzliche Zeile Nullen hinzugefügt. Bei der Faltung ist zu beachten, dass das Integralbild zur Vermeidung von Verzerrungen an den Bildrändern entsprechend erweitert werden muss. Aus dem lokalen Mittelwert wird der Schwellwert bestimmt und mit dem Intensitätswert des Pixel verglichen. Durch die Vergleichsoperation entsteht ein Binärbild der segmentierten Objekte. Durch die Verwendung des Prinzips der Integralbilder ist die Laufzeit des Verfahrens unabhängig von der Fenstergröße. Das adaptive Schwellwertverfahren ist aufgrund der lokalen Schwellwertberechnung deutlich robuster gegenüber lokalen Intensitätsschwankungen als ein globales Schwellwertverfahren. Im Vergleich mit den in Abschnitt 4.5 vorgestellten Segmentierungsverfahren zeigte das adaptiven Schwellwertverfahren die besten Resultate bei der Segmentierung der Marker (siehe Abbildung 4.16).

Im zweiten Schritt wird die Merkmalsdetektion und -extraktion optimiert. Der in Abschnitt 4.6 verwendete SURF-Algorithmus zeigt, dass durch die Verwendung von Integralbildern in Kombination mit Boxfiltern erhebliche Performancesteigerungen bei der Merkmalsdetektion möglich sind. Einen anderen, ähnlichen Ansatz verfolgen der CenSurE [AKB08] (-Center Surround Extremas) und der SUSurE [EMC09] (-Speeded Up Surround Extrema)-Algorithmus. Bei diesen Algorithmen werden einfache Approximationen sogenannter „Bi-Level Laplacian of Gaussian (BLoG) [PH02]“ zur Merkmalsdetektion eingesetzt (siehe Abbildung 4.17). In dieser Arbeit wird der SUSurE-Algorithmus zur Detektion der Merkmale adaptiert. Der SUSurE-Algorithmus nutzt zur Detektion der Merkmale einen quadratischen Filterkern (siehe Abb. 4.17 c). Die Detektion der Merkmale verläuft dabei in drei Schritten. Zuerst wird die Antwort der vereinfachten BLoG-Filter berechnet. Zur Berechnung der Filterantwort werden die Intensitätswerte des äußeren und inneren Rechtecks jeweils aufsummiert, die Summen durch ihre jeweilige Fläche geteilt und voneinander abgezogen. Die Normierung sorgt für einen Gleichanteil von Null und eine Normalisierung bezüglich der Skala. Die Länge des äußeren und inneren Rechtecks sind dabei durch $4n + 1$ beziehungsweise $2n + 1$ (mit n als Skala) gegeben. Durch den Einsatz der Integralbilder ist die Berechnung der Flächen der Rechtecke beziehungsweise der Filterantwort unabhängig von der Filtergröße beziehungsweise der Skala. Im zweiten Schritt werden die schwachen Filterantworten durch eine Schwellwertoperation und eine sogenannte „Non-Maximum-Suppression“ entfernt. Die Non-Maximum-Suppression wird in einer $3 \times 3 \times 3$-Nachbarschaft durchgeführt. Sie wird effizient durch eine Dilatation mit einem $3 \times 3 \times 3$-Würfel aus Einsen implementiert. Diese Operation ent-

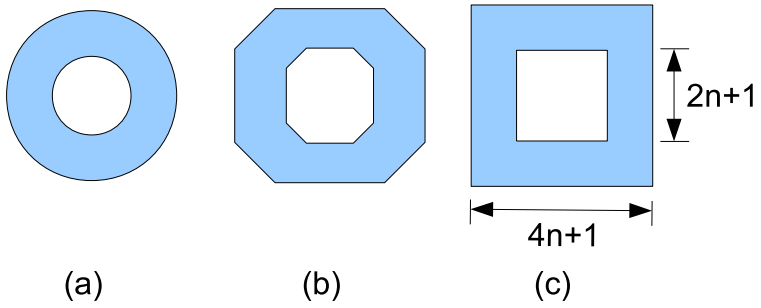
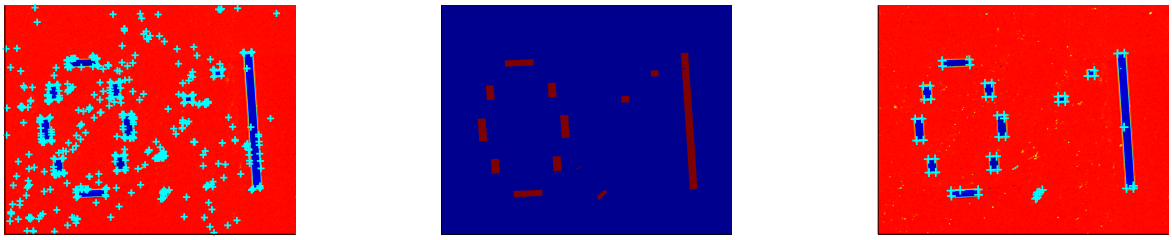


Abbildung 4.17: Approximierte Bi-level LoG Filter: (a) kreisförmig (b) achteckig (c) quadratisch (nach [EMC09]).

spricht einem Maximum-Filter. Im dritten Schritt erfolgt für die verbliebenen Kandidatenpunkte eine Berechnung ihrer „Stärke“ als Eckpunkte auf Basis des Harris-Eckendetektors [HS88]. Dazu wird die Matrix der zweiten Momente H auf Basis der partiellen Ableitungen (L_x, L_y) der Antworten der Filterfunktion L gebildet:

$$H = \begin{bmatrix} \sum L_x^2 & \sum L_x L_y \\ \sum L_x L_y & \sum L_y^2 \end{bmatrix}$$

Die Summation der partiellen Ableitungen erfolgt dabei für jeden Kandidatenpunkt in einem quadratischen Fenster. Die Fenstergröße ist dabei in Abhängigkeit von der Skala des Kandidatenpunktes durch die äußere Länge des zugehörigen Filters als $4n + 1$ gegeben. Nach der Berechnung der Matrix der zweiten Momente dient das Verhältnis ihrer Spur zu ihrer Determinante einer weiteren finalen Selektion der Merkmalspunkt (Harris-Eckendetektor). Die so gewonnenen Merkmalspunkte enthalten noch eine große Anzahl von Merkmalen außerhalb der zu registrierenden Marker, welche entfernt werden müssen. Der in Abschnitt 4.5 zur Eckendetektion verwendete Algorithmus [HY04] nutzt relativ komplexe und aufwendige Methoden zu dieser notwendigen Reduktion der Merkmale. Dabei wird z.B. die Krümmung der Konturen zur Bestimmung der Eckpunkte herangezogen. Eine einfache, effiziente Methode zur Reduktion der Merkmale ist die Verwendung des aus der Segmentierung der Marker gewonnenen Binärbildes der Markerobjekte in Form einer Maske (siehe Abbildung 4.18). Durch die vorgenommenen Optimierungen am LM-ICP-PC-refined-Algorithmus ist dieser nicht nur schneller, sondern ebenfalls genauer (siehe Tabelle 4.3 / siehe Abbildung 4.19).



(a) **(b)** **(c)**

Abbildung 4.18: Reduktion der Merkmale: (a) Merkmalspunkte (SUSurE) vor Reduktion (b) Binärbild des segmentierten Markers (c) Merkmalspunkte nach Reduktion.

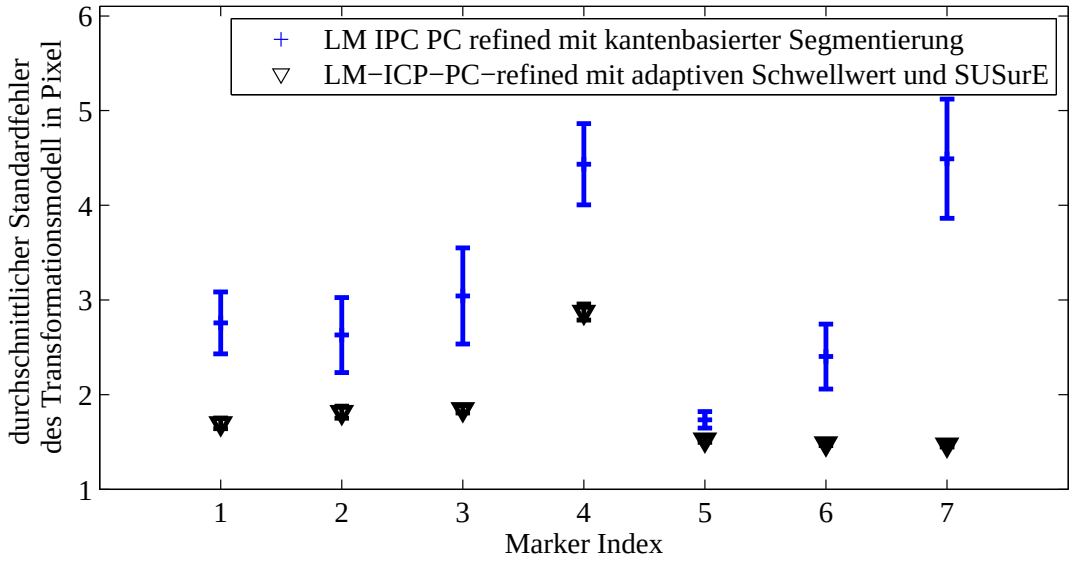


Abbildung 4.19: Vergleich des LM-ICP-refined-Algorithmus mit seiner optimierten Version (Konfidenzniveau von 95%).

Tabelle 4.3: Vergleich des LM-ICP-refined-Algorithmus mit seiner optimierten Version basierend auf dem durchschnittlichen Standardfehler des Transformationsmodells (in Pixel) beim Erreichen der Konvergenz (Konfidenzniveau von 95%).

Marker Index	LM-ICP-PC-refined	LM-ICP-PC-refined optimiert
1	$2{,}76 \pm 0{,}33$	$1{,}70 \pm 0{,}06$
2	$2{,}63 \pm 0{,}40$	$1{,}81 \pm 0{,}06$
3	$3{,}04 \pm 0{,}51$	$1{,}85 \pm 0{,}04$
4	$4{,}43 \pm 0{,}43$	$2{,}87 \pm 0{,}08$
5	$1{,}73 \pm 0{,}09$	$1{,}52 \pm 0{,}03$
6	$2{,}40 \pm 0{,}34$	$1{,}48 \pm 0{,}02$
7	$4{,}49 \pm 0{,}63$	$4{,}49 \pm 0{,}63$

4.8 Vorwissensbasierte AFM-Messungen

Die praktische Umsetzung des Gesamtkonzepts der vorwissensbasierten AFM-Messung zeigte, dass es ein paar wichtige Ergänzungen zu den größtenteils theoretischen Betrachtungen der vorherigen Unterkapitel geben sollte. Bei großflächigen Proben oder Proben mit weiträumig verteilten Messelementen erwies sich die Erstellung einer kompletten Oberflächenkarte als nicht sinnvoll. Bei einer Probe mit Abmaßen von $18\,\mathrm{mm} \times 18\,\mathrm{mm}$ und einer optischen Auflösung $0{,}5\,\mu\mathrm{m}$ ergibt sich einen Integer-Array von 36000×36000 Elementen. Der Aufwand zur Speicherung und die Rechenzeit zur Verarbeitung stehen in keinem günstigen Verhältnis zum Nutzen. Das Problem kann durch die alleinige Speicherung der relevanten Gebiete der Oberfläche in einer verteilten Karte gelöst werden. Um die metrologische Verwertbarkeit der Bilddaten zu gewährleisten ist es notwendig die Einzelelemente der verteilten Oberflächenkarte neben den Bilddaten, der ersten Datenschicht, mit einer zweiten Schicht, den Koordinatenwerten, zu versehen. Diese Vorgehensweise wird bereits bei der Speicherung von Satellitendaten in Form des GeoTIFF-Formats eingesetzt. Eine weitere Maßnahme zur Reduktion des Rechenaufwands ist die Abspeicherung der Marker in einer vorverarbeiteten Form. Auf diese Weise muss der Marker nicht bei jeder Bildregistrierung erneut verarbeitet werden. Er wird nur einmal bei der Erstellung des Messplans generiert. Die Erstellung von marker-basierten Messplänen ist nur bei oft wiederholten Messaufgaben wie z.B. Kalibrierung oder Qualitätssicherung in einer Produktionslinie sinnvoll. Für den metrologischen „Hausgebrauch“ ist es sinnvoll Messpläne direkt aus den aktuellen Koordinaten zu erstellen. Für diese Aufgabe wurde eine leicht bedienbare Benutzerschnittstelle geschaffen. Eine weitere praxisnahe Funktion zeigt die Messelemente eines geladenen Messplans optisch im Mikroskopbild an. Diese Funktion ist wichtig für die Validierung der Messpläne durch den Benutzer. Es zeigt sich, dass die Unsicherheit der durch Bildregistrierung von Markern erstellten Bezugssysteme je nach Randbedingungen relativ hoch sein kann. Dies lässt sich vor allem auf die Unsicherheit der Mikroskopkalibrierung zurückführen. Des Weiteren ist der Auflösungsbereich des optischen Mikroskops mit $0{,}5\,\mu\mathrm{m}$ weit von der lateralen Auflösung der NMM mit $0{,}1\,\mathrm{nm}$ entfernt. Aus diesem Grund ist es unter Umständen notwendig, für die markerbasierten Messung einen zweistufigen Alignmentalgorithmus durchzuführen. In einem ersten Schritt wird das Bezugssystem mit Hilfe des optischen

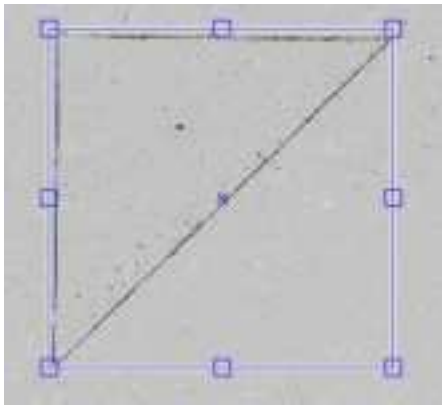


Abbildung 4.20: Erkannte Alignmentstruktur des VLSI Standards.

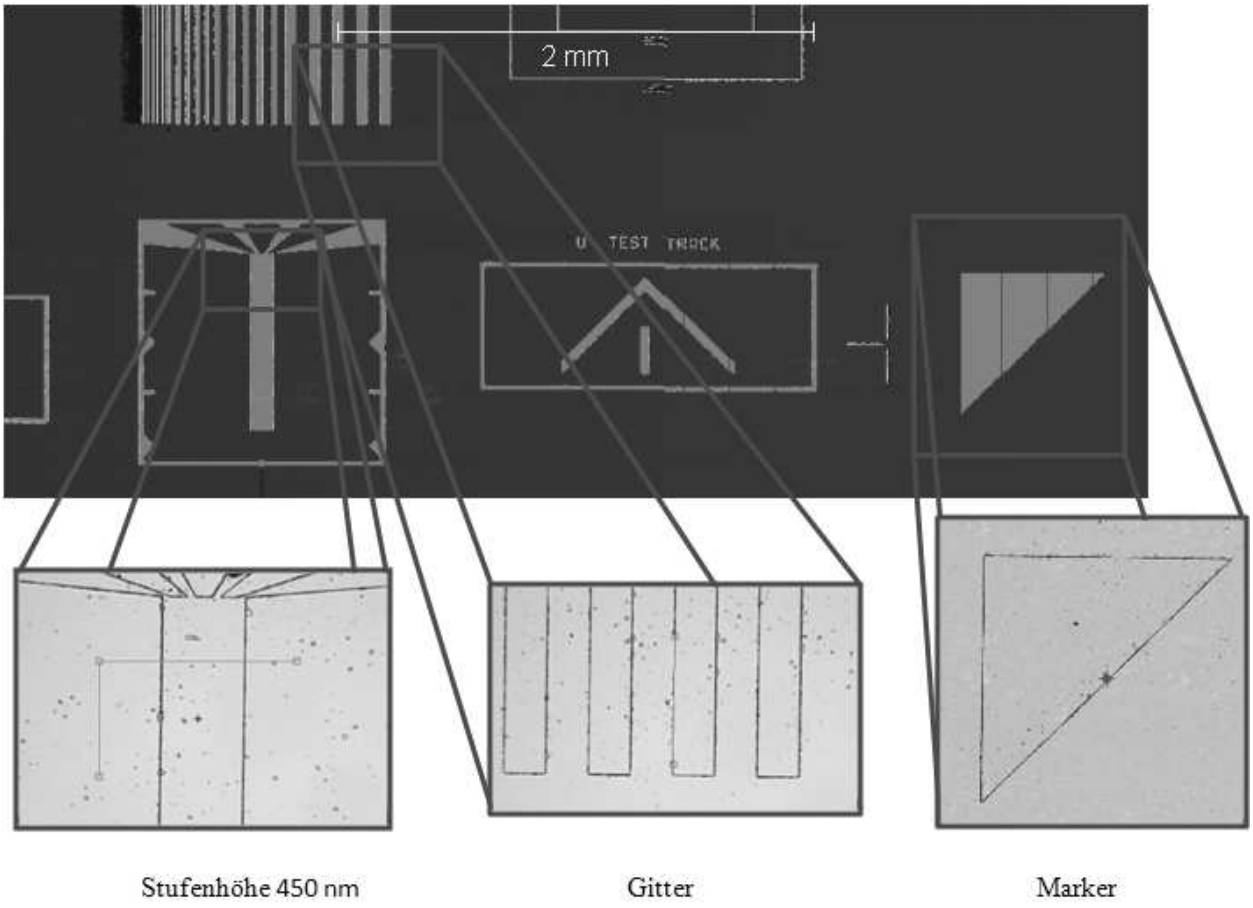


Abbildung 4.21: Zusammengefügte Übersichtskarte eines VLSI Stufenhöhenstandards ($450\,\mathrm{nm}$).

Mikroskops und der Bildregistrierung erkannt. In einem zweiten Schritt wird ein zweites Bezugssystem mit Hilfe des AFM anhand von vordefinierten Messelementen, z.B. zwei Geraden, gemessen. Zur finalen Messung der Messelemente des Messplans wird allein das durch das AFM gemessene Bezugssystem herangezogen. Zur Veranschaulichung der vorwissenbasierten Messungen wurde am Beispiel einer VLSI-Stufenhöhe ($450\,\mathrm{nm}$) ein minimaler Messplan mit verschiedenen Beispielaufgaben erstellt und abgefahren. Eine erste Frage, die man sich bei der Erstellung eines Messplanes stellen sollte, ist die Frage: „Was ist ein guter Marker?“. Zu ihrer Beantwortung hilft auch die Klarheit darüber, welche Merkmale ein guter Marker möglichst nicht haben sollte. Wenn man einen rotations- und skaleninvarianten Bildregistrierungsalgorithmus verwendet, dann ist die Wahl eines punktsymmetrischen Markers beziehungsweise eines Markers mit zwei Symmetrieachsen nicht sinnvoll, da man die Orientierung des Markers nicht eineindeutig bestimmen kann. Ähnlich verhält es sich mit Strukturen, die aus verkleinerten Versionen von sich selbst aufgebaut sind. Periodischen Strukturen sind problematisch. Bei solchen Strukturen kommt zum Auftauchen von mehreren Korrelationspeaks, was die Bestimmung der lateralen Verschiebung unmöglich macht. Zusammenfassend, die Struktur des Markers darf einer eineindeutigen Abbildung nicht im Wege stehen. Ein Marker sollte möglichst in einem einzigen Bildfeld der Kamera Platz finden. Da es beim Zusammensetzen einzelner Kamerabilder zu einem größeren Gesamtbild immer Fehler gibt. Dies resultiert aus der Unsicherheit der Kamerakalibierung. Marker sollten ebenfalls nur einmal

auf der Probe vorkommen. Die Entfernung zwischen einem Marker und den Messelementen spielt keine Rolle. Aus den genannten Gründen wurde die Alignment-Struktur des VLSI-Standards (siehe Abbildung 4.21, unten rechts) als Marker verwendet. Die eigentliche Messaufgabe besteht in der Messung der Stufenhöhe (siehe Abbildung 4.21, unten links) und eines Teils der Gitterstrukturen (siehe Abbildung 4.21, unten Mitte). Nach der Erkennung der Alignment-Struktur mittels Bildregistierung (siehe Abbildung 4.20) wird der Messplan automatisch abgefahren. Es konnten alle Messelemente sicher angefahren und gemessen werden. Zur Auswertung werden alle Elemente graphisch dargestellt. An dieser einfachen Messaufgabe konnte die grundsätzliche Funktionsweise des Konzepts des vorwissensbasierten Messens demonstriert werden. Grundsätzlich ist das Konzept auf andere Sensoren schnell und einfach übertragbar. Die Visualisierung der Messdaten soll anhand der Beispieldaten im folgenden Unterkapitel behandelt werden.

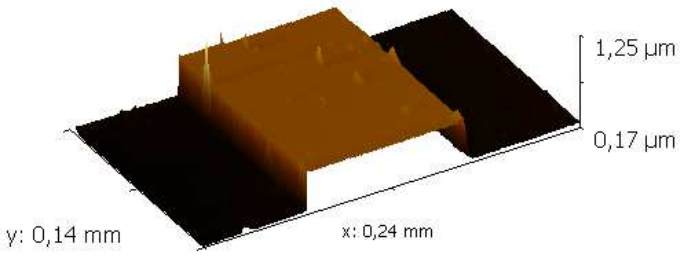


Abbildung 4.22: Stufenhöhe $450\,\mathrm{nm}$; Messpunktabstand: $20\,\mathrm{nm}$; Messlinienabstand: $5\,\mu\mathrm{m}$.

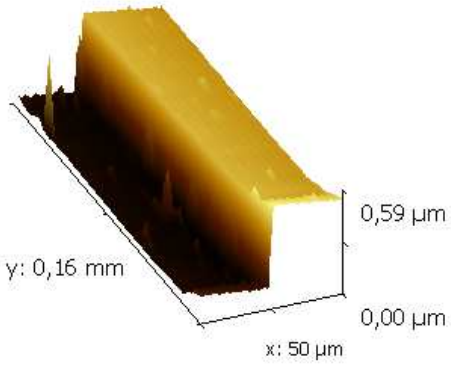


Abbildung 4.23: Messung der ersten Gerade Messpunktabstand: $20\,\mathrm{nm}$; Messlinienabstand: $5\,\mu\mathrm{m}$.

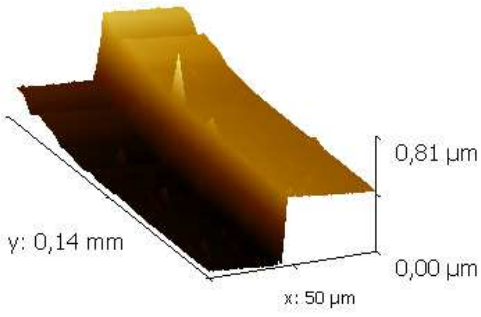


Abbildung 4.24: Messung der zweiten Gerade Messpunktabstand: $20\,\mathrm{nm}$; Messlinienabstand: $5\,\mu\mathrm{m}$.

4.9 Visualisierung von Messdaten

Die Visualisierung spielt eine große Rolle um die Messergebnisse für den Benutzer begreifbar und verständlich zu machen. Bei der programmiertechnischen Umsetzung einer Visualisierung der Messdaten ergeben sich verschiedene Fragestellungen:

1. Wie geht man mit extrem hohen Auflösungen und den daraus resultierenden Datenmengen aus Sicht des Speicherbedarfs um?

2. Wie stellt man fragmentierte Messdaten dar?

3. Wie können verschiedene Schichten von Messdaten (z.B. multisensorische Messdaten) sinnvoll dargestellt werden?

Diese Fragestellungen wurden bereits in großen Teilen bei der Visualisierung von Satellitendaten untersucht. Bei der Darstellung von Satellitendaten stellen sich ähnliche Probleme wie in der Nanometrologie. Der Messraum ist im Vergleich zur maximalen Auflösung gigantisch. Auf diese Weise entstehen ähnlich große Datenmengen. Gleichsam sind Satellitendaten oftmals multisensorisch. Für die Verarbeitung eines kompletten Datensatzes ist der Arbeitsspeicher gegebenfalls nicht ausreichend. Eine visuelle Darstellung in voller Auflösung ist somit speichertechnisch nicht möglich und aufgrund der relativ geringen Auflösung eines Computermonitors auch nicht sinnvoll. Zur Lösung dieses Darstellungsproblems wurden in der Vergangenheit effiziente Algorithmen zur Datenreduktion entwickelt. Dabei handelt es sich um eine sogenannte „Gauß-Laplace-Pyramide“ [Ros80, BA83, AAB+84]. Im Rahmen der Gauß-Laplace-Pyramide werden zwei Operationen, „REDUCE“ (Downsampling) und „EXPAND“ (Upsampling), definiert. Zur Erzeugung einer Gauß-Laplace-Pyramide wird zuerst eine Gauß-Pyramide mittels der REDUCE-Operation erstellt. Dazu wird das Ausgangsbild g_0 durch einen speziellen Filterkern gewichtet und die Stützstellen in jeder Dimension halbiert (siehe Abbildung 4.25). Das so entstandene Bild g_1 hat nur noch ein Viertel der Fläche von g_0. Durch iterative Wiederholung der REDUCE-Operation wird die gesamte Gauß-Pyramide erzeugt. Bei der Expand-Operation wird die Nachbarschaft eines Knotens gewichtet und die Anzahl der Stützstellen in jeder Dimension verdoppelt. D.h. die Fläche vervierfacht sich durch die EXPAND-Operation. Die Gewichtung hat in beiden Fällen einen Tiefpasscharakter. Somit sind beide Operation mit einem Informationsverlust behaftet und die EXPAND-Operation stellt nicht die Inverse zur REDUCE-Operation dar. Zur Rekonstruktion des Bildes ist die Definition einer geeigneten Vorschrift notwendig. Die Rekonstruktion erfolgt mit Hilfe der Laplace-Pyramide. Die Laplace-Pyramide L_n wird erzeugt, indem man die Differenz zwischen zwei Ebenen der Gauß-Pyramide bildet, der Ebene g_n und der expandierten Version von g_{n+1}. Mit $L_n = g_n$ kann das Bild g_0 allein auf Basis der Laplace-Pyramide rekonstruiert werden. Im Anwendungsfall werden speziell bei der Übertragung von Satellitendaten über das Internet zu allererst nur die niedrigen Frequenzen übertragen und dargestellt. Danach wird auf Basis dieser Daten und der laufenden Übertragung des hohen Frequenzen das Bild stückweise

weiter rekonstruiert. Diese Methodik ist in vielerlei Hinsicht vorteilhaft für die visuelle Darstellung von Daten der Nanometrologie. In erster Linie kann auf schnelle effiziente Art und Weise eine unterabgetastete Version der Messdaten zur visuellen Darstellung erzeugt werden. In zweiter Linie lassen sich Zoom-Operationen effizient implementieren. Die Interpolation arbeitet nicht mit den vollständigen Messdatensatz, sondern mit einer reduzierten Version der Messdaten. Sind die Messdaten zu groß für den Arbeitspeicher, so können die Interpolationsalgorithmen auch so implementiert werden, dass die Interpolationen blockweise durchführt werden. Es ist anzumerken, dass die Interpolationsfunktionen nur für die visuelle Darstellung geeignet sind. Im Anwendungsfall würde die Benutzerschnittstelle die interpolierten Daten visuell dem Nutzer präsentieren. Allerdings würden alle metrologische Auswertefunktionen im Hintergrund mit den Originaldaten arbeiten. Problematisch erweisen sich fragmentierte Messdaten in der visuellen Darstellung. Fragmentierte Messdaten entstehen dann, wenn die Messoberfläche nur partiell gemessen wurde. Für die Zwischenräume sind keine Messdaten vorhanden. Eine visuelle Darstellung ist nicht ohne vorherige Bearbeitung möglich. Aus diesem Grund wurde folgender Algorithmus entwickelt, um eine metrologische korrekte Darstellung von fragmentierten Datensätzen zu erreichen:

Eingabeparameter: Auflösung, Messdaten (XYZ-Vektorendaten)

1. Bestimmung der Maxima und Minima der lateralen Koordinaten des gesamten Datensatzes
2. Erstellung des Basisgitters (Initialisierung mit 0)
3. Bestimmung der lokalen Maxima und Minima der lateralen Koordinaten für jedes Messelement
4. Detrending der Messelemente
5. Interpolation der Oberfläche der Messelemente in Koordinatenwerte des Basisgitters
6. Speichern der interpolierten Messelemente im Basisgitter
7. Abspeichern des Basisgitters

Auf diese Weise wurden die Messdaten des Beispiels aus Kapitel 4.8 zusammengefügt (siehe Abbildung 4.26). Voraussetzung für die Anwendung des Algorithmus ist, dass die Messdaten alle in einem gemeinsamen Koordinatensystem gemessen wurden.

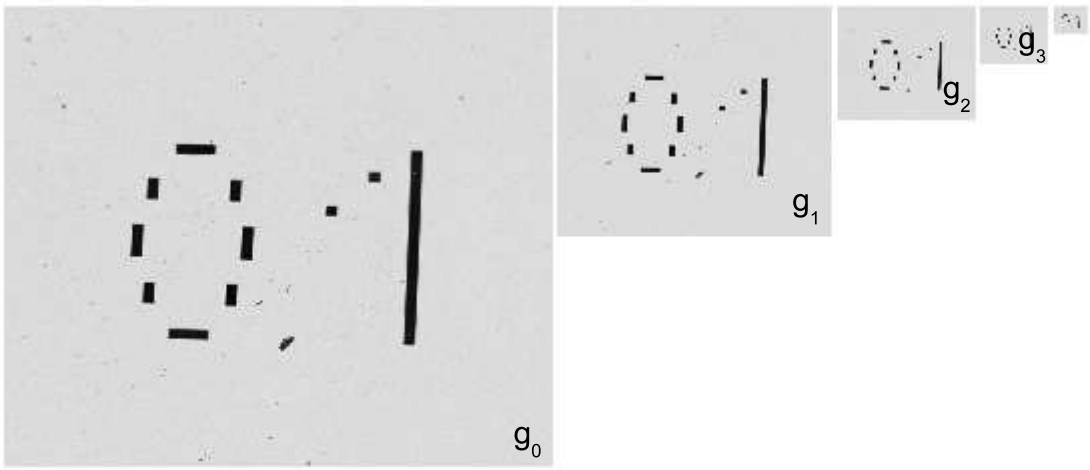


Abbildung 4.25: Downsampling auf Basis einer Gauß-Pyramide.

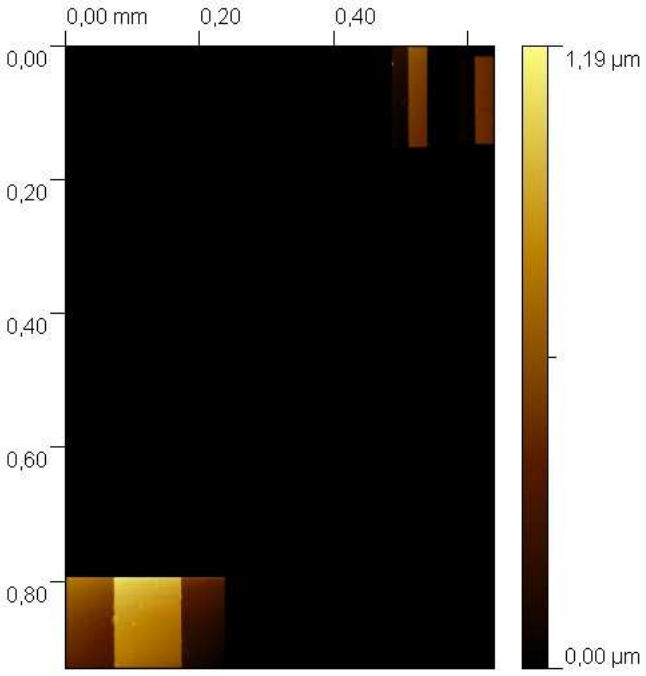


Abbildung 4.26: Übersichtsdarstellung der Messdaten der Beispielmessung (Auflösung $0{,}5\ \mu\mathrm{m}$).

Kapitel 5

Automatische Kalibrierung der Nanometer-Koordinaten-Messmaschine

Die Kalibrierung von AFMs sollte eine alltägliche Standardprozedur sein, denn nur auf diese Weise ist eine quantitative Verwertbarkeit der Messdaten gegeben. Dies scheint jedoch nicht der Fall zu sein. Laut Aussagen von Branchenvertretern auf dem Co-Nanomet-Workshop (Braunschweig, 19.-20.10.2009) führen nur 50 Prozent der AFM-Nutzer überhaupt eine Kalibrierung durch. Die andere Hälfte nimmt durch eine nicht durchgeführte Kalibrierung relative Fehler von bis zu 20 Prozent billigend in Kauf. Die Hauptgründe hierfür sind:

- Kalibriernormale sind relativ teuer in der Anschaffung.
- Es gibt kein Bewusstsein für die Notwendigkeit einer Kalibrierung.
- Die notwendigen Kenntnisse fehlen beim Bedienpersonal.

Im folgenden Kapitel wird einerseits die Kalibrierung der NCMM exemplarisch durchgeführt um Faktoren, die die Messunsicherheit der NCMM beeinflussen, abzuschätzen. Andererseits sollen die bereits in der Richtlinie VDI 2656 enthaltenen Methoden validiert und vertieft werden. Die Kalibrierung sollte im alltäglichen Betrieb eines Messlabors regelmäßig durchgeführt werden. Aus diesem Grund werden Methoden zur Automatisierung der Kalibrierung untersucht. Ziel dieser Untersuchungen ist es den Zeitaufwand für die Kalibrierungen zu minimieren und somit die Akzeptanz guter wissenschaftlicher Praxis auch in dem Wissenschaftsbetrieb fernen Einrichtungen zu fördern. Gleichzeitig soll der menschliche Fehlerfaktor durch automatisierte Kalibrierungen minimiert und so eine höhere Reproduzierbarkeit erreicht werden.

5.1 Kalibrierung der Spitzengeometrie

Beim Abrastern der Oberfläche wird in den Messdaten nicht nur die Geometrie der „realen“ Oberfläche, sondern ebenfalls die Geometrie der Cantileverspitze abgebildet. Für die eigentliche Kalibrierung der NCMM ist es notwendig, die Geometrie der Spitze zu kennen sowie Veränderungen der Spitzengeometrie zu überwachen. Die Änderung der Spitzengeometrie aufgrund von Verschleiß während des Messen stellt einen wichtigen Unsicherheitsfaktor dar. Die Auswirkungen der Spitzengeometrie auf AFM-Messungen wurden bereits in der Vergangenheit hinreichend untersucht. Es wurden zwei Methoden zur Rekonstruktion der realen Messoberfläche aus den verzerrten Messdaten entwickelt [Kel91, Vil97]. Breite Anwendung findet allerdings nur die morphologische Rekonstruktion nach *Villarubia*. Mittlerweile wurde der Ansatz der morphologischen Rekonstruktion unter Verwendung eines auf Drexel basierenden Algorithmus auf allgemeine Geometrien erweitert [TQV08, QV07]. Durch die Verallgemeinerung können nun ebenfalls Messdaten von CD-AFMs und Messdaten mit Hinterschneidungen an überhängenden Kanten rekonstruiert werden. Für das hier verwendete AFM ist jedoch der erste Algorithmus von Villarubia [Vil97] aufgrund seiner höheren Performance bei gleichem Ergebnis ausreichend [QV07]. Zur Auswertung der Messdaten und zur Gewinnung der Spitzengeometrie, einer sogenannten „Blind Tip Estimation“, wurde der von *Villarubia* entwickelte und veröffentlichte Algorithmus [Vil97] von der Programmiersprache C nach Matlab portiert. Aufgrund der geringen Performance des ursprünglichen Algorithmus in Matlab war eine Optimierung notwendig.

Folgende Optimierungen wurden durchgeführt:

- Die morphologischen Operationen Erosion, Dilatation und Öffnen werden durch optimierte, Matlab-eigene Funktionen ersetzt.
- Der eigentliche Kern des Algorithmus besteht aus vier ineinander verschaltelten For-Schleifen. Davon wurden zwei For-Schleifen durch effizientere Matrixoperationen (Vektorisierung) ersetzt.
- Eine weitere Optimierung ist durch den Einsatz von „logischer Indizierung“, einer Matlab-spezifischen Technik, möglich.

5.2 Kalibrierung der Nanometer-Koordinaten-Messmaschine nach VDI 2656

Die VDI-Richtlinie 2656 stellt einen sehr guten Ausgangspunkt für die weiteren Untersuchungen dar. In ihr wird detailiert beschrieben wie eine Kalibrierung für AFMs abzulaufen hat. Es wird vielfach auf Standardmethoden der digitalen Signalverarbeitung verwiesen. Durch die Kalibrierung können Faktoren, die die Messunsicherheit der NCMM beieinflussen, eingeschätzt werden. Die folgenden Abschnitte orientieren sich, ähnlich einem Protokoll, stark am Aufbau der VDI-Richtlinie.

Kalibrierintervalle Je nach Nutzungsart, Anforderungen und messtechnischer Kategorie variiert der Abstand der Kalibrierintervalle. Bei der NCMM zeigen die lateralen Achsen prinzipbedingt eine hohe Langzeitstabilität. Die Z-Achse, das Rasterkraftmikroskop, sollte wöchentlich beziehungsweise für Präzisionsmessungen täglich kalibriert werden.

Vorbereitende Charakterisierung des Messsystems Vor der eigentlichen Kalibrierung hat eine Einschätzung von extrinsischen und intrinsischen Einflussfaktoren auf die Unsicherheit zu erfolgen.

Extrinsische Faktoren:

- Temperatur
- Luftfeuchte
- Mechanische und akustische Schwingungen

In der Vergangenheit wurde bereits das Temperaturverhalten der NCMM hinreichend untersucht [Gru09]. Aufgrund von Änderungen im Gerätedesign und dem Austausch von Komponenten ist jedoch eine erneute Evaluation notwendig. Basierend auf den in der Vergangenheit gewonnenen Erfahrungen wurde die Mikroskopkamera durch ein neues Modell mit deutlich geringerer Verlustleistung ersetzt. Um einen Eintrag von Wärme durch die Mikroskopbeleuchtung zu minimieren, wird diese während der Messung abgeschaltet. Die Versuche zur Temperaturstabilisierung werden nicht weiter verfolgt, da das System im Dauerbetrieb im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung betrieben wird und somit eine Stabilisierung nicht sinnvoll ist. Die Luftfeuchte wird durch die Klimatisierung des Reinraums konstant gehalten. Ein luftgedämpfter, schwingungsisolierender Tisch dient zur Reduktion der Einwirkung von Fundamentschwingungen und Trittschall. Akustische Schwingungen werden durch eine Schallschutzhaube reduziert. Durch die Nutzung der Schallschutzhaube wird das Rauschen des Messsystems etwa um eine Größenordnung reduziert.

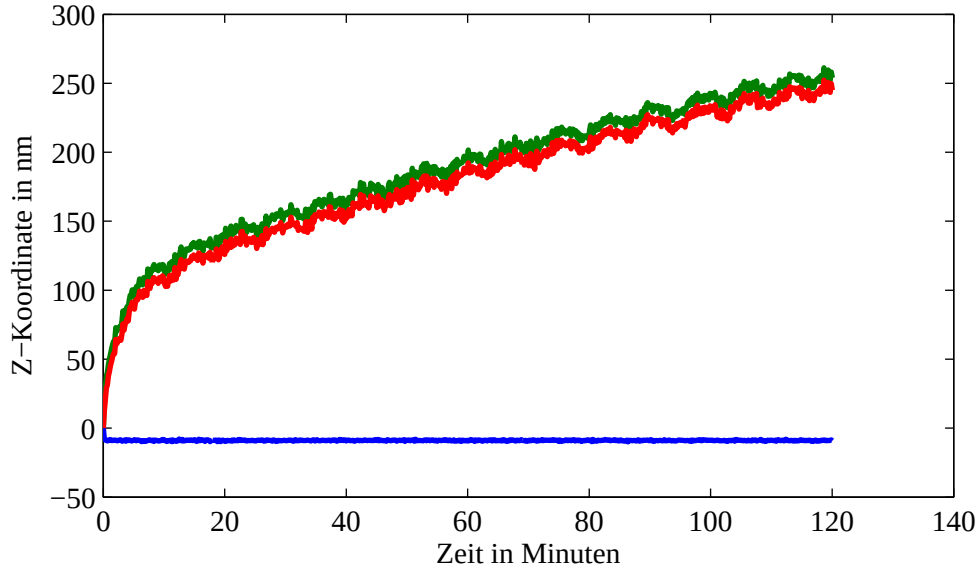


Abbildung 5.1: Drift der Z-Achse (statisch): Interferometersignal (blau; ohne Trend); Signal des Dehnmessstreifens des AFMs (grün); Differenzsignal (rot).

Intrinsische Faktoren:

- Drift
- Rauschen des Geräts (mechanisch, elektrisch, digital)
- Führungsabweichungen

Innerhalb der Voruntersuchung des Systems sollen nun laut VDI 2656 das Driftverhalten nach Erreichen des thermischen Gleichgewichtszustands, sowie das Rauschen und Führungsverhalten der lateralen und vertikalen Achsen untersucht werden. Zur Untersuchung der Drift in Z-Richtung wurde eine automatische Routine geschrieben. Der Benutzer wählt im Messbereich des optischen Mikroskops einen Punkt an, welcher in einem benutzerdefinierten Zeitinterval über eine vordefinierte Zeit statisch mit dem AFM gemessen wird. Zur Messung der Drift wird ein Ebenheitsnormal verwendet, um Einflüsse durch eine möglicherweise vorhandene laterale Drift zu minimieren. „Statisch“ heißt in diesem Fall die Probe wird mit dem AFM angetastet und anschließend nicht mehr aktiv bewegt. Es werden automatisch ein Graph und eine Protokolldatei über die Drift erstellt. Abbildung 5.1 zeigt einen charakteristischen Verlauf der Drift in Z-Richtung, welcher nach Erreichen des thermischen Gleichgewichts und erfolgter Antastung mit dem AFM gemessen werden kann. Die Drift zeigt anfangs eine charakteristische Exponentialform und geht später in eine lineare Drift über. Der Großteil der Drift findet in den ersten 20 min statt. Ein anfängliches Offset in den ersten Werten ist durch Schwingungen beim und kurz nach dem Antastvorgang zu erklären. Der überwiegende Teil der Drift wird durch das AFM erzeugt. Neben der statischen Messung wurde ebenfalls eine Routine zur Messung der dynamischen Drift implementiert. „Dynamisch“ heißt in diesem Kontext, die Probe wird ähnlich einer realen Messung lateral bewegt. Die NCMM führt bei der dynamischen Messung wiederholt einen Linienscan vordefinierter Länge mit vordefinierter

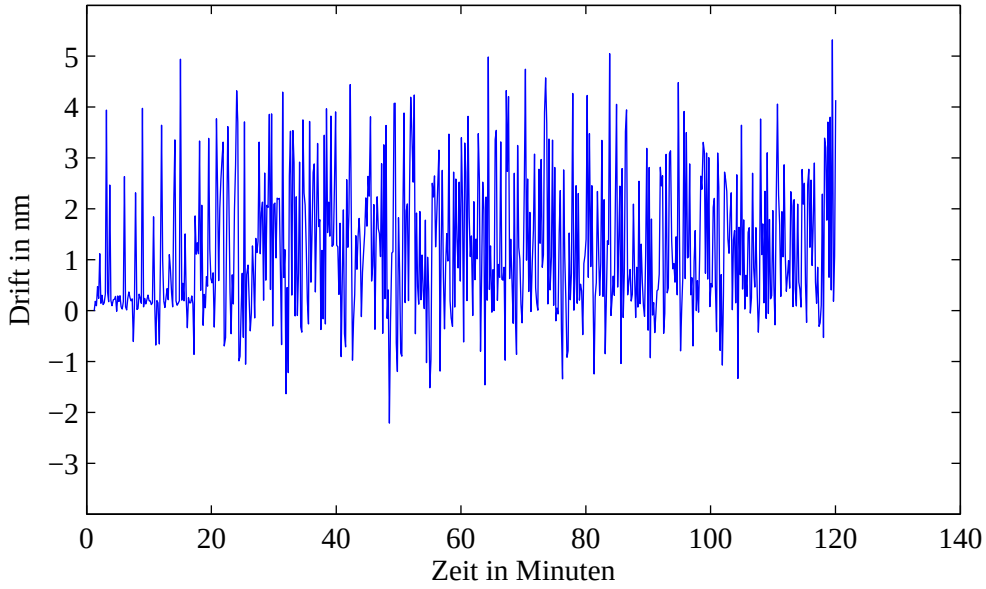


Abbildung 5.2: Drift der Z-Achse (dynamisch).

Geschwindigkeit aus. In das automatisch erstellte Protokoll und die graphische Darstellung gehen der Median aller Höhenwerte eines einzelnen Linienscans sowie dessen Zeitindex ein. Abbildung 5.2 zeigt einen charakteristischen Verlauf des dynamischen Driftverhaltens der Z-Achse bei einer Messgeschwindigkeit von $7\,\mu\mathrm{m/s}$ und einer Messfeldlänge von $35\,\mu\mathrm{m}$. Interessanterweise ist im Gegensatz zum statischen Driftverhalten bei der Messung der dynamischen Drift nur eine minimale Drift von wenigen Nanometern zu beobachten. Zur Messung der lateralen Drift wird ein 2D-Gitter (VLSI STS3-1800P $180\,\mathrm{nm}$ nominale Höhe, $10\,\mu\mathrm{m}$ Pitch) sowie eine Region auf dem Ebenheitsnormal mit einer Fehlstelle genutzt. Die Messung der lateralen Drift wurde automatisiert, allerdings ist die Auswertung der Messdaten auf automatische Weise nur bedingt möglich, da eine Vielzahl von Störungen die Auswertung beeinflussen können. Zur Auswertung der Verschiebung beziehungsweise der Drift zwischen zwei Teilmessungen wird ein Kreuzkorrelationsalgorithmus angewendet. Bei der Messung der lateralen Drift an einer Fehlstelle des Ebenheitsnormals zeigt sich, dass die laterale Drift nahezu linear ist und auch nach 80 Minuten nicht abnimmt (siehe Abbildung 5.3). Es zeigt sich eine auffallende Ähnlichkeit zwischen den Verläufen der Drift beider lateraler Achsen.

Neben der Drift wird ebenfalls das Rauschen des Gerätes untersucht. Die VDI-Richtlinie 2656 sieht für die Untersuchung des Rauschens ähnlich der Drift-Untersuchung statische und dynamische Messungen vor. Die Untersuchungen konnten ebenfalls automatisiert werden. Bei der Untersuchung des Rauschens in Z-Richtung wird zwischen dem Rauschen des metrologischen Sensors des AFMs, dem Rauschen des Z-Interferometers und dem Rauschen der Differenz aus beiden unterschieden. Durch die Differenzbildung aus beiden Signalen werden periodische Störungen minimiert, wie die Auswertung der Messungen zeigt. Neben der statischen Messung der Rqz-Werte wird das Rauschen des Gerätes mittels FFT auf charakteristische Frequenzen hin un-

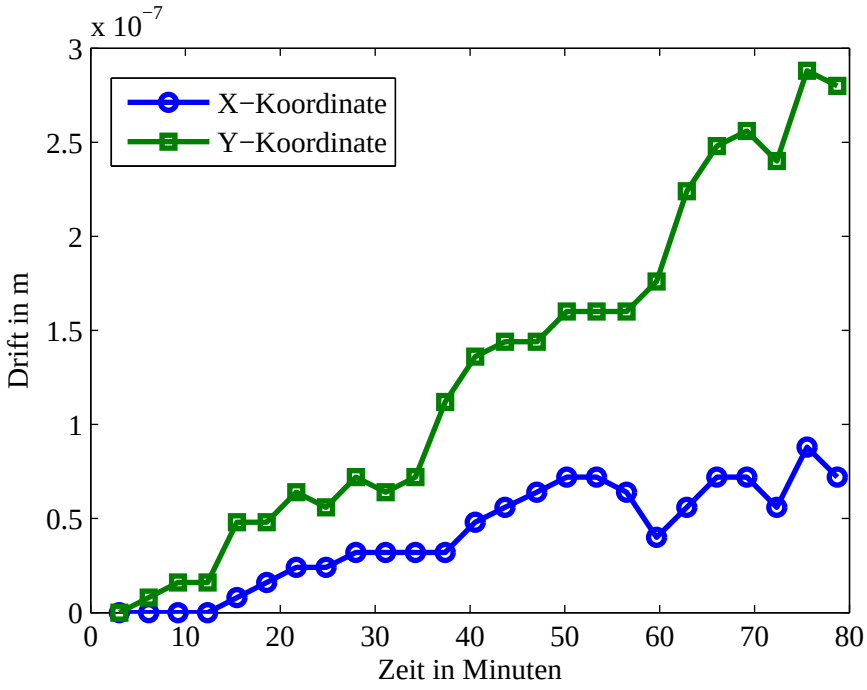


Abbildung 5.3: Laterale Drift (Messparameter: Messgeschwindigkeit: $3\,\mu m/s$ / Messlinienabstand: $0.008\,\mu m$ / Messpunktabstand: $8\,nm$).

tersucht. Der Hauptteil des Rauschens wird durch das AFM erzeugt. Bei der Auswertung des Rauschens im Frequenzbereich zeigen sich im Signal des Dehnmessstreifens dominante Frequenzen um die $30\,Hz$ sowie ein „Netzbrummen“ bei $50\,Hz$ und dessen Oberwellen.

Die Auswertung der Messdaten für das statistische Rauschverhalten ergibt folgende Werte:

- Rauschen des Dehnmessstreifens des AFMs: $2{,}38\,nm$
- Rauschen des Z-Interferometers der NMM: $0{,}41\,nm$
- Rauschen des Differenzsignals: $2{,}39\,nm$

Die Auswertung der Messdaten für das dynamische Rauschverhalten ergibt folgende Werte:
Bewegung in der X-Achse:

- Rauschen des Dehnmessstreifens des AFMs: $3{,}96\,nm$
- Rauschen des Z-Interferometers der NMM: $0{,}52\,nm$
- Rauschen des Differenzsignals: $3{,}92\,nm$

Bewegung in der Y-Achse:

- Rauschen des Dehnmessstreifens des AFMs: $3{,}84\,nm$
- Rauschen des Z-Interferometers der NMM: $0{,}57\,nm$

- Rauschen des Differenzsignals: $3{,}85\,\mathrm{nm}$

Ein dritter intrinsischer Faktor ist das Führungsverhalten. Für die Untersuchung des Führungsverhaltens in Z-Richtung wird ebenfalls ein Ebenheitsnormal verwendet. Bei dieser Untersuchung wird ein Gebiet auf dem Ebenheitsnormal wiederholt gescannt (laut Richtlinie größer oder gleich 9-mal). Charakteristische Führungsabweichungen äußern sich bei konventionellen Rasterkraftmikroskopen durch einen sogenannten „scanner bow“ oder aber in Form von zeilenweisen Sprüngen in Z-Richtung. Bei der Untersuchung der Führungsabweichungen in Z-Richtung zeigt sich innerhalb der ersten 100 Minuten ein starkes Driftverhalten in Z-Richtung (siehe Abbildung 5.4). In der ersten Messung beträgt die Drift ca. 160 nm. In der zweiten Messung beträgt die Drift ca. $50\,\mathrm{nm}$. Danach stabilisiert sich die Drift bei Werten von 10 bis $20\,\mathrm{nm}$ (siehe Abbildung 5.5). Neben der Drift zeigt sich noch eine Periodizität der Störungen. Die Periodizität in der langsamen Scanrichtung, der X-Achse, entsteht höchstwahrscheinlich durch den Einfluß von Streulicht (siehe Abschnitt 3.1). Die periodischen Störungen in der schnellen Scanrichtung, der Y-Achse, entstehen durch das Regelverhalten des Rasterkraftmikroskops, höchstwahrscheinlich durch die Nachstellung des Setpoints während der Messung. Bei den Messdaten der NMM sind hingegen nur minimale, punktförmige, zufällige Störungen zu erkennen (siehe Abbildung 5.6).

Es werden folgende Arbeitsanweisungen für zukünftige Kalibrierungen und Messungen aus Untersuchungen und Erfahrungswerten abgeleitet:

1. Die Wartezeit nach Einschalten des Gerätes sollte 24 Stunden betragen.
2. Die Wartezeit nach kurzzeitigem Öffnen der Schallschutzhaube (ca. 5 Minuten) beträgt mindestens 30 Minuten.
3. Die Vorscanzeit beträgt mindestens 100 Minuten.
4. Kalibriernormale und Proben sind zu akklimatisieren. Die Dauer der Akklimatisierungsphase ist abhängig vom Material und Volumen und ist gegebenenfalls zu evaluieren.

Kalibrierung. Im ersten Teil der eigentlichen Kalibrierung werden die Führungsabweichungen der x- und y-Achse nochmals eingehend untersucht. Hierfür wird eine Fläche definierter Größe mit einer definierten Geschwindigkeit wiederholt gemessen. Nach jeder Einzelmessung wird das Messareal in einer zufälligen Richtung mit einer Distanz größer der Korrelationslänge verschoben. Nach einer Anzahl von größer/gleich neun Messungen erfolgt eine Mittelung über alle Messungen. Zur Nivellierung der Daten wird eine linearer Regression durchgeführt. Bei konventionellen Rasterkraftmikroskopen treten oftmals charakteristische Verzerrungen auf. Sind diese Verzerrungen langzeitstabil können sie durch ein Polynom approximiert werden und zur Korrektur der Messdaten verwendet werden. Bei der NCMM zeigen sich aufgrund der Entkoppelung der Achsen keine solchen Verzerrungen (siehe Abbildung 5.7). Bei den Ebenheitsabweichungen der NCMM zeigen sich vor allem singuläre Verzerrungen. Der für die Kalibrierung ausschlaggebende P-V-Wert hat

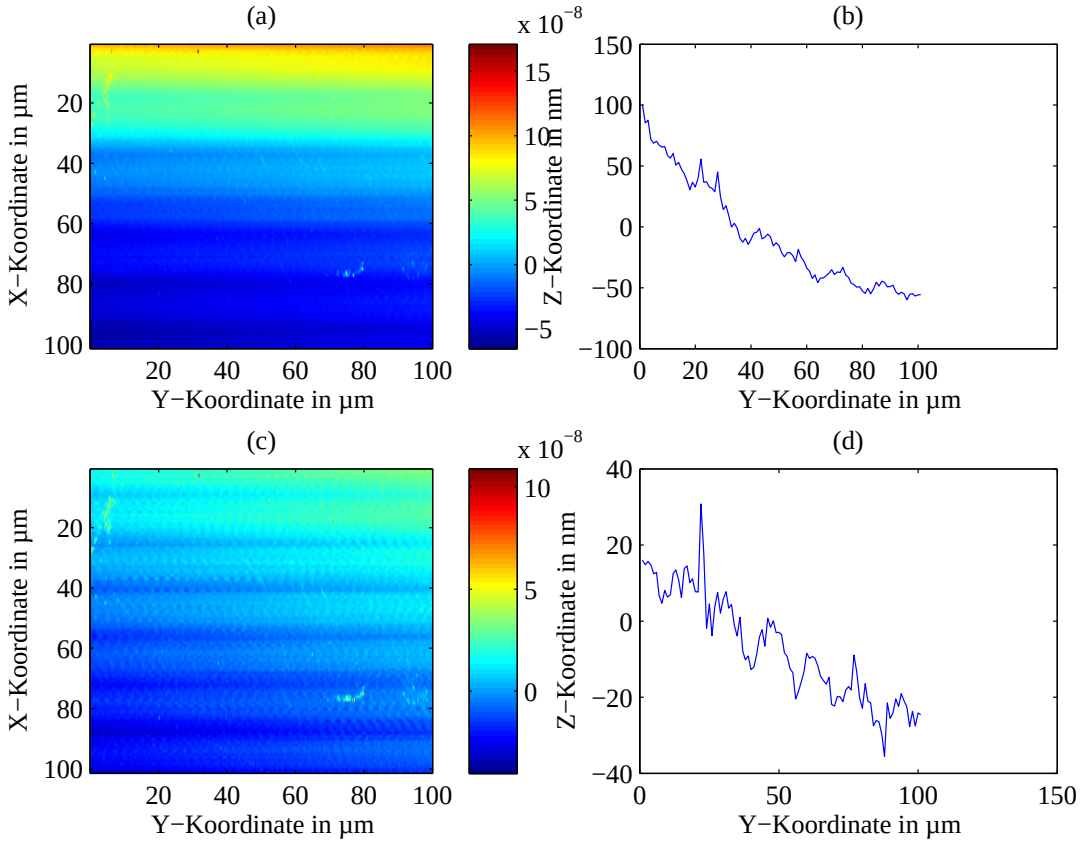


Abbildung 5.4: Führungsabweichungen in Z-Richtung (xtz,ytz): (a) AFM-Messdaten der ersten Messung (Z-Koordinate als Farbbalken in Meter); (b) Schnitt durch alle Messlinien der ersten Messung in X-Richtung; (c) AFM-Messdaten der zweiten Messung (Z-Koordinate als Farbbalken in Meter); (d) Schnitt durch alle Messlinien der zweiten Messung in X-Richtung (Messparameter: Messgeschwindigkeit: 7 $\mu m/s$ / Messlinienabstand: 1 μm / Messpunktabstand: 20 nm).

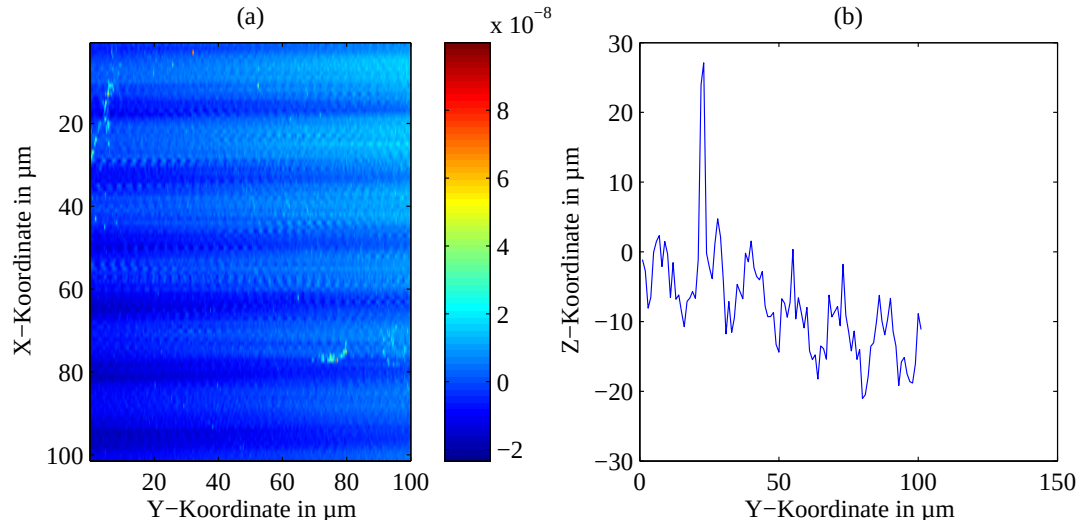


Abbildung 5.5: Führungsabweichungen in Z-Richtung (xtz,ytz): (a) AFM-Messdaten der dritten Messung (Z-Koordinate als Farbbalken in Meter); (b) Schnitt durch alle Messlinien der dritten Messung in X-Richtung (Messparameter: Messgeschwindigkeit: 7 $\mu m/s$ / Messlinienabstand: 1 μm / Messpunktabstand: 20 nm).

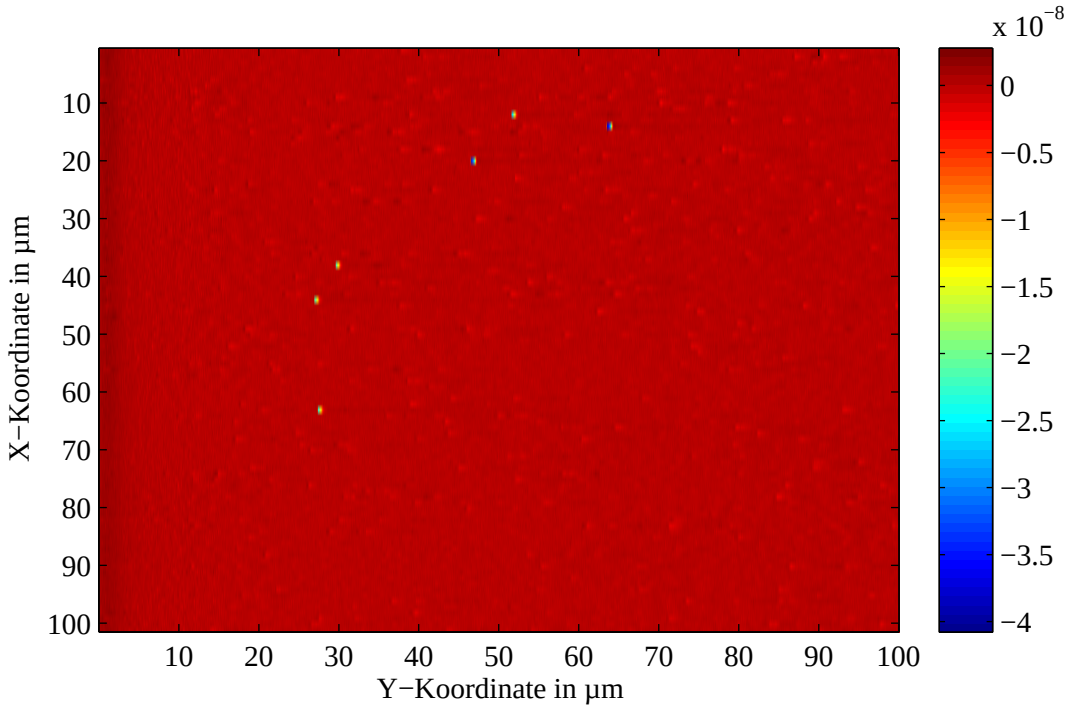


Abbildung 5.6: Führungsabweichungen in Z-Richtung (xtz,ytz): Messdaten des Z-Interferometers in der dritten Messung (Messparameter: Messgeschwindigkeit: $7\,\mu\mathrm{m/s}$ / Messlinienabstand: $1\,\mu\mathrm{m}$ / Messpunktabstand: $20\,\mathrm{nm}$).

einen Wert von: $56{,}55\,\mathrm{nm}$.

Im zweiten Teil der Kalibrierung werden die lateralen Achsen kalibriert und ebenfalls auf Nichtlinearitäten untersucht. Für die laterale Kalibrierung stand ein VLSI Standard zur Verfügung (STS3-1800P). Dieser Standard besteht aus drei 2D-Gittern mit unterschiedlichem Pitch ($3\,\mu\mathrm{m}$, $10\,\mu\mathrm{m}$, $20\,\mu\mathrm{m}$) auf einer Fläche von jeweils $275\,\mu\mathrm{m} \times 275\,\mu\mathrm{m}$ (siehe Abbildung 5.8). Die Stufenhöhe beträgt ca. $180\,\mathrm{nm}$. Zur Erstellung eines Messplans für eine automatisierte Messung wird die auf dem Normal vorhandene Markierung genutzt (siehe Abbildung 5.8 oben links). Die Messdaten (siehe Abbildung 5.9) wurden mit einer Messgeschwindigkeit von $7\,\mu\mathrm{m/s}$ mit einer Auflösung von $400\,\mathrm{nm}$ gewonnen. Für die Auswertung der Messdaten wird aufgrund der großen Periode eine Auswertung im Ortsraum mit der Center-of-Gravity-Methode durchgeführt.

Es konnten die folgenden Resultate gesammelt werden:

Tabelle 5.1: Messergebnisse der Kalibrierung der lateralen Achsen.

	Pitch (gemessen) in $\mu\mathrm{m}$	Pitch (zertifiziert) in $\mu\mathrm{m}$	Kalibrierfaktor
X-Achse	9,957	$9{,}997 \pm 0{,}028$	1,004
Y-Achse	9,992	$9{,}997 \pm 0{,}028$	1,001

Der errechnete Pitch für die X-Achse zeigte eine Abweichung, die nicht mit der Unsicherheit des Normals erklärt werden kann. Die Positionsabweichungen beider Achsen wurden nach VDI 2656

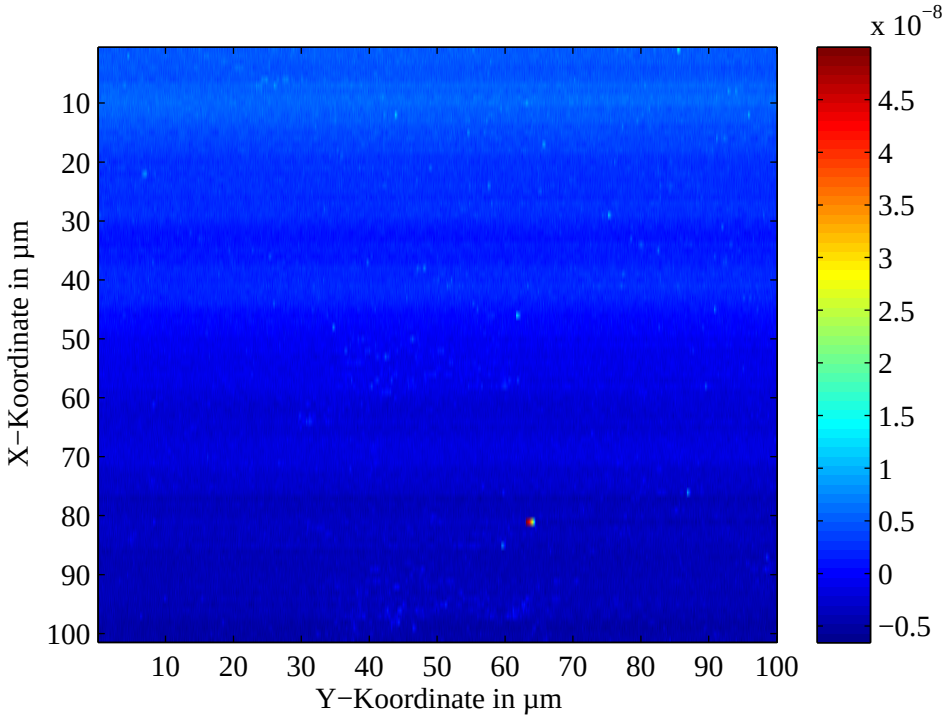


Abbildung 5.7: Gemittelter Daten aus 10 Messungen nach Ebenenabzug (Z-Koordinate als Farbenbalken in Meter / Messparameter: Messpunktabstand: $100\,\mathrm{nm}$; Messlinienabstand: $1\,\mu\mathrm{m}$; Messgeschwindigkeit: $7\,\mu\mathrm{m/s}$).

ebenfalls ausgewertet (siehe Abbildung 5.10). Die Positionsabweichungen der X-Achse sind auch hier etwas größer als die der Y-Achse. Dies läßt sich durch eine verbleibende laterale Drift erklären, welche aufgrund der größeren Zeitkonstante einen größeren Einfluss auf die langsame Scanachse (hier die X-Achse) hat. Neben der Auswertung im Ortsraum durch die Center-of-Gravity-Methode kann die Auswertung ebenfalls im Frequenzraum mittels der „refined FFT“-Methode [DKP+05] erfolgen. Zur Anwendung der Methode ist die Messung einer hinreichenden Anzahl von Strukturen notwendig. Für den Einsatz dieser Methode ist kein zertifiziertes Normal verfügbar gewesen. Zur Korrektur der Probenverkippung und der Welligkeit wird ein Tiefpassfilter verwendet [DKP+05]. Die „verfeinerte FFT“-Methode bestimmt zuerst den maximalen Peak mittels FFT, um ihn danach mittels diskreter Fouriertransformation (DFT) iterativ zu verbessern (siehe Abbildung 5.11).

Im dritten Teil der Kalibrierung ist die Z-Achse sowie das Übersprechen der Z-Achse auf die lateralen Achsen Gegenstand der Untersuchung. Eine Automatisierung der in der VDI-Richtlinie beschriebenen Methode ist nur bedingt möglich, da ein manueller Wechsel der Normale notwendig ist. Nach dem manuellen Einlegen der Normale kann eine Automatisierung über eine Registerierung der auf der Probe vorhandenen Marker erfolgen. Bei Normalen mit sehr kleinen Stufen (z.B. $8{,}8\,\mathrm{nm}$) sind diese Marker nur schwierig optisch zu erkennen, was eine Automatisierung bei sehr kleinen Stufenhöhen erschwert. In früheren Untersuchungen wurde bereits gezeigt, dass der metrologische Sensor des AFMs, ein Dehnmessstreifen, ein Hysterese-Verhalten aufweist [Pet03]. In Abbildung 5.12 wird dieser Sachverhalt anhand einer exemplarischen Kalibriermessung des

Dehnmessstreifen veranschaulicht. Dieses Verhalten ist ein Hauptfaktor für die Messunsicherheit der NCMM. Es zeigt sich, dass sich diese Hystereseverhalten bei einer bestehenden Verkippung der Probe um eine oder beide laterale Achsen sehr negativ auf die Messergebnisse auswirkt. Abbildung 5.13 zeigt die Messung einer $18{,}9\,\mathrm{nm}$ - VLSI Stufenhöhe vor und nach dem Detrending. Aufgrund des Durchlaufens der Hysterese ist es somit nicht möglich bei größeren Verkippungen mittels eines Ebenenabzugs die reale Oberfläche zu rekonstruieren.
Für die Kalibrierung der Z-Achse wurden Messungen an Stufenhöhen verschiedener Höhe (siehe Abbildungen 5.14, 5.15, 5.16) durchgeführt. Zur Auswertung wurden beide in der VDI-Richtlinie beschriebenen Methoden (Histogramm-Methode, DIN EN ISO 5436-1) angewandt und die Ergebnisse (siehe Tabelle 5.2) verglichen. In der VDI-Richtlinie wird der Histogramm-Methode eine höhere Anfälligkeit für Regelungsabweichungen beigemessen, da bei ihr im Gegensatz zur Methode nach ISO 5436 die Flanken der Stufenhöhen ebenfalls in die Aufwertung eingezogen werden. Es zeigt sich in den Messung, dass die Methode nach ISO 5436 tatsächlich besser für die Kalibrierung geeignet ist. Die Umsetzung der Messungen zur Bestimmung der Nichtlinearität der Z-Achse beziehungsweise des Übersprechens sind in ihrer praktischen Umsetzung schwierig. Bei diesen Untersuchungen wird ein Satz unterschiedlich hoher Stufenhöhen verwendet, um die Abhängigkeit der Kalibrierparameter von der Nähe zum Arbeitspunkt zu bestimmen. Der notwendige Wechsel der unterschiedlichen Normale und die Einstellung des richtigen Set-Point sind nur schwierig reproduzierbar zu realisieren. Eine Automatisierung ist aufgrund des notwendigen manuellen Wechsels der Normale nicht möglich. Aus diesen Gründen wird an dieser Stelle ein anderer Algorithmus angewandt. Dieser Algorithmus verwendet das Z-Interferometer der NMM als Referenz zur Kalibrierung des Dehnmessstreifens. Im Gegensatz zum bereits vorhandenen Kalibrieralgorithmus für den A/D-Wandler werden bei diesem Algorithmus keine Rampenprofile, sondern Bewegungsprofile in Form von Stufenhöhen gefahren. Diese Stufenhöhenprofile werden nach der ISO 5436-Methode ausgewertet. Die Änderung der verwendeten Profilform beruht auf der Tatsache, dass Rampenprofil durch das Anfahren und Abbremsen stärker gestört sind. Dieses Störungen lassen sich nicht entfernen. Bei den Stufenhöhen-Bewegungsprofilen sind diese Störungen durch die ISO 5436-Methode abgedeckt und können entfernt werden. Als Messkörper hierbei wird ein Ebenheitsnormal verwendet. Dieser Algorithmus erlaubt es die Nichtlinearitäten in einer beliebigen Höhenauflösung zu untersuchen und ist nicht durch die Anzahl der Stufenhöhennormale beschränkt. Außerdem ist dieser Algorithmus automatisierbar. Durch den Wegfall des Wechsels der Normale wird einerseits die Reproduzierbarkeit erhöht, andererseits verringert sich die Messzeit für die Kalibrierung erheblich. In Zukunft sollte diese Methode zur Kalibrierung des A/D-Wandlers eingesetzt werden, da sie aus metrologischer Sicht überlegen ist. Die Messung der Nichtlinearität der Z-Achse zeigt zwei Bereiche unterschiedlicher Steigung (siehe Abbildung 5.17).

Tabelle 5.2: Messergebnisse der Kalibrierung der Z-Achse.

zertifizierter Höhenwert in nm	gemessener Höhenwert in nm		Kalibrierfaktor C_Z	
	ISO 5436	Histogramm	ISO 5436	Histogramm
$18{,}9 \pm 0{,}8$	$20{,}6 \pm 1{,}3$	$20{,}9 \pm 1{,}5$	$0{,}918$	$0{,}904$
$43{,}3 \pm 0{,}7$	$46{,}8 \pm 1{,}5$	$46{,}6 \pm 2{,}2$	$0{,}925$	$0{,}929$
$94{,}8 \pm 1{,}2$	$101{,}2 \pm 2{,}3$	$100{,}8 \pm 2{,}2$	$0{,}937$	$0{,}941$

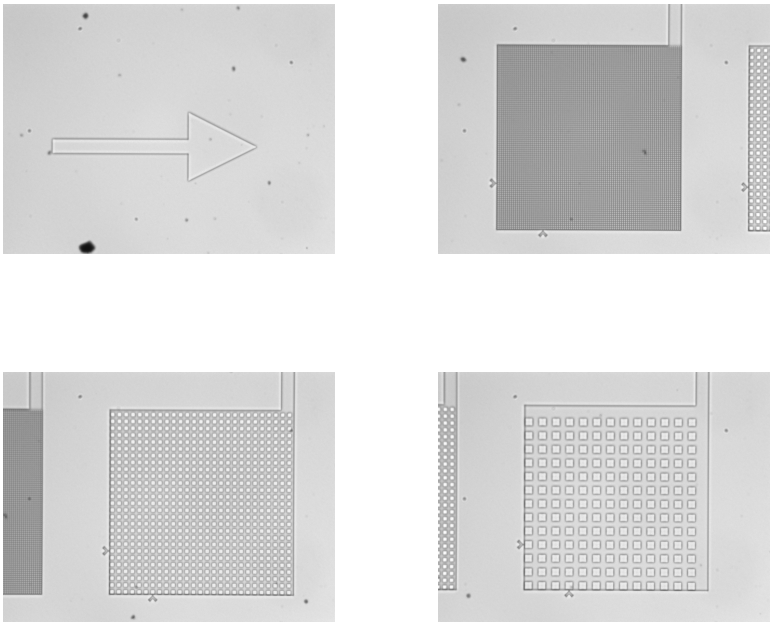


Abbildung 5.8: Mikroskopbilder des VLSI Standards STS3-1800P; Orientierungspfeil (oben links); 2D-Gitter mit $3\ \mu\mathrm{m}$ Pitch (oben rechts); 2D-Gitter mit $10\ \mu\mathrm{m}$ Pitch (unten rechts); 2D-Gitter mit $20\ \mu\mathrm{m}$ Pitch (unten links).

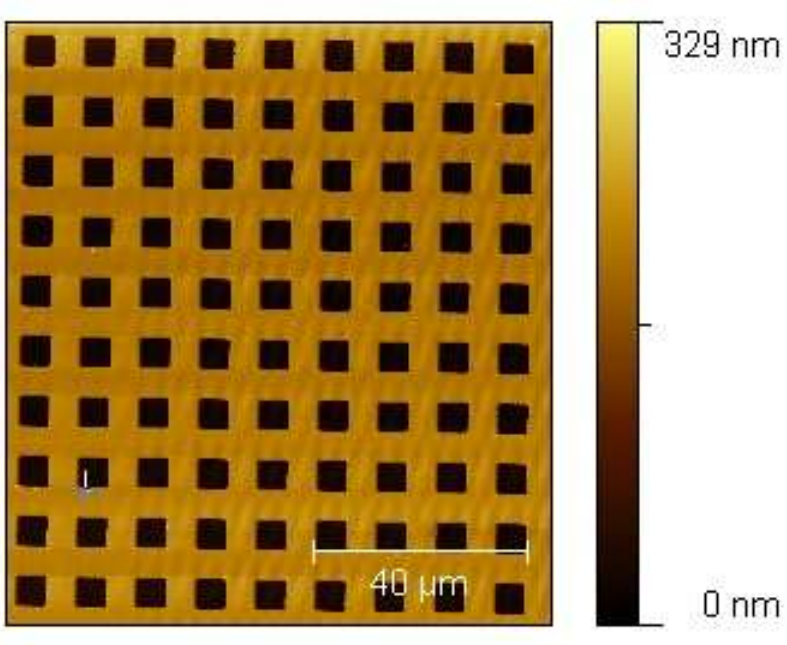


Abbildung 5.9: AFM-Messdaten des 2D-Gitters mit 10 µm Pitch.

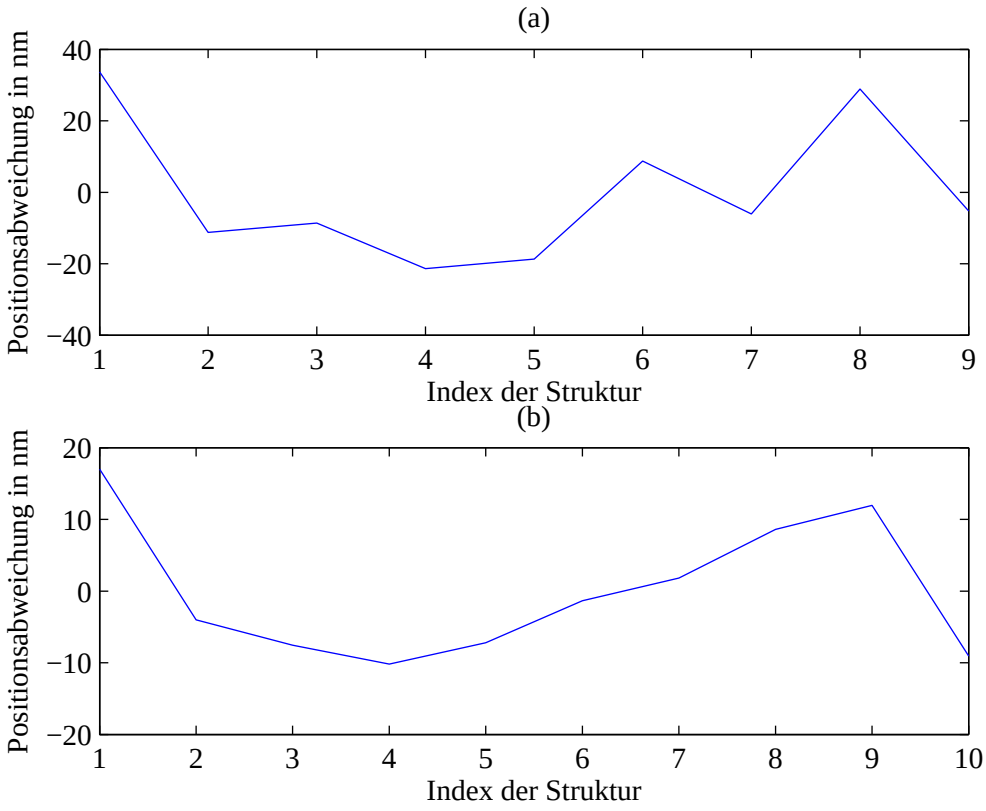


Abbildung 5.10: AFM-Messdaten des 2D-Gitters mit 10 µm Pitch.

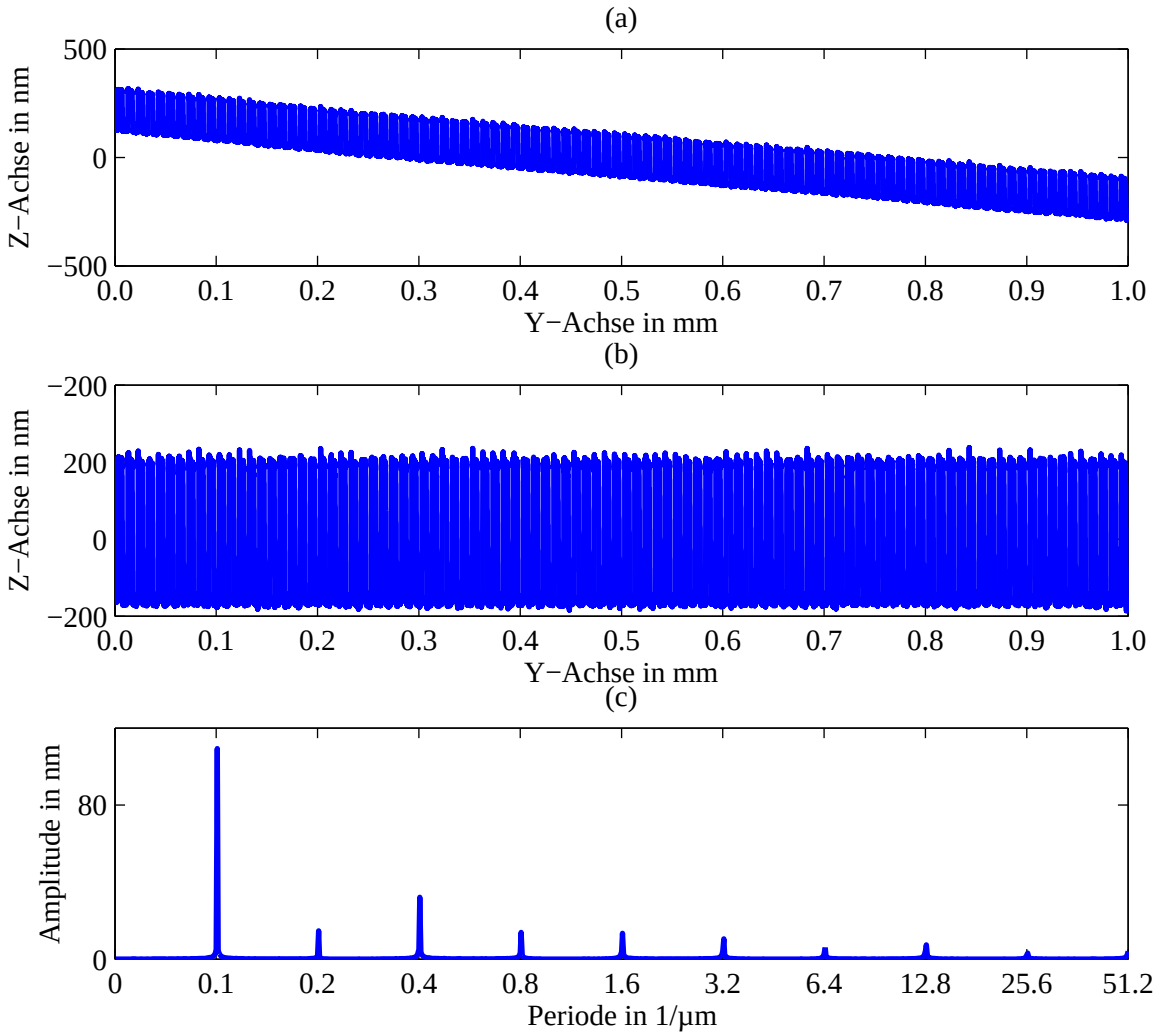


Abbildung 5.11: Periodenbestimmung im Frequenzraum: (a) Verkipptes Profil des 2D-Gitters (Pitch: 10 µm, Messgeschwindigkeit: 7 µm/s, Messpunktabstand: 20 nm (b) Profil nach Entfernung der Verkippung sowie der Welligkeit (c) Ausschnitt aus dem Amplitudenspektrum des Messprofils.

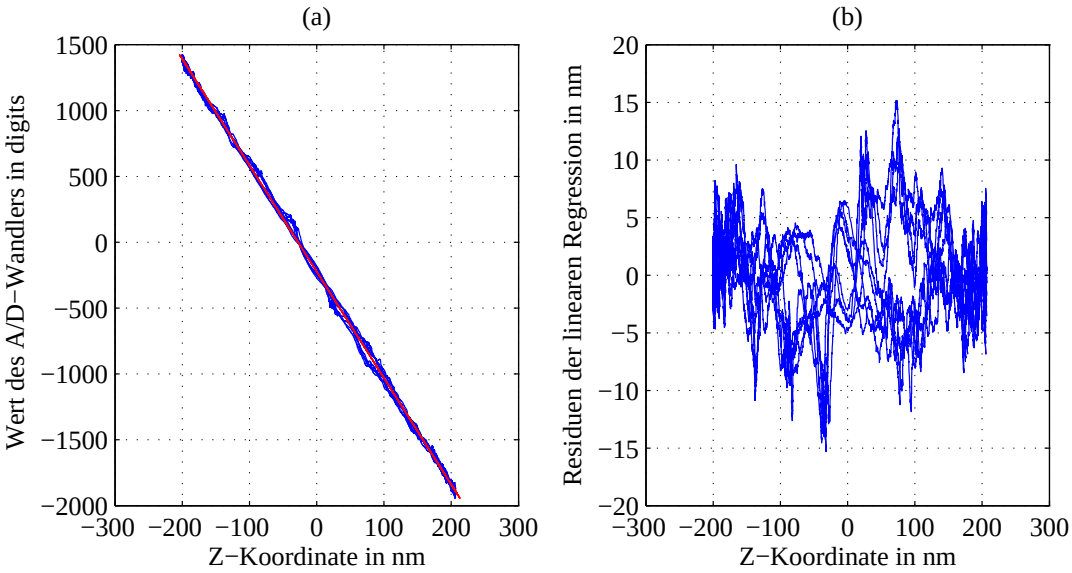


Abbildung 5.12: Kalibrierung des Dehnmessstreifens über das Z-Interferometer der NMM: (a) lineare Regression zwischen den Werten des Z-Interferometer und den A/D-Werten des Dehnmessstreifens; (b) Residuen der linearen Regression über die Höhenwerte des Z-Interferometers aufgetragen.

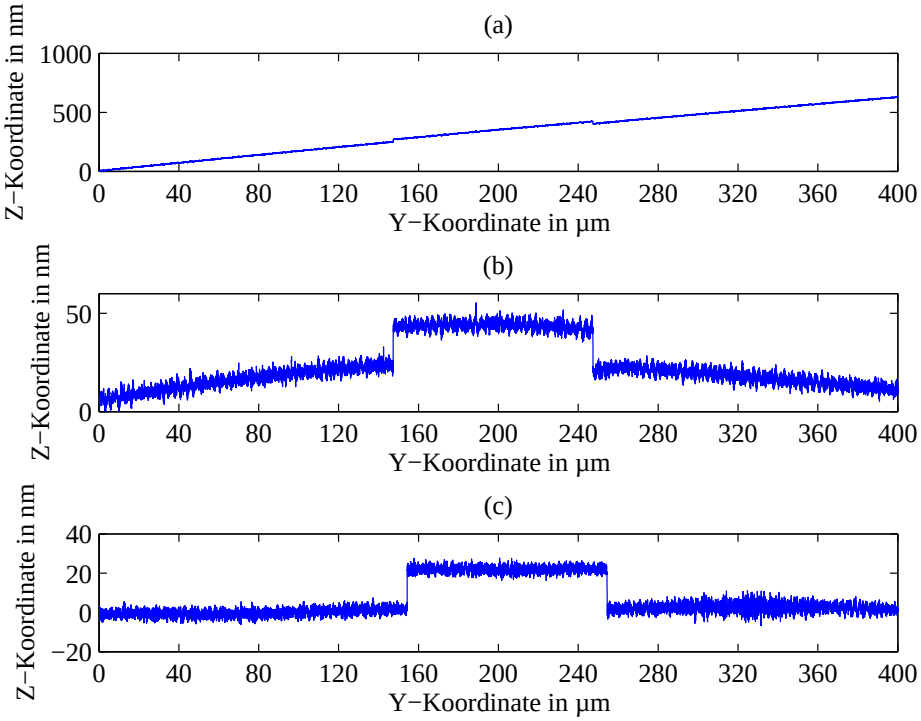


Abbildung 5.13: Vertikales Übersprechen bei vorhandener Verkippung der Probe: (a) Messprofil einer $18{,}9\,\mathrm{nm}$ - VLSI Stufenhöhe mit Verkippung; (b) parabolisch verzerrtes Messprofil von (a) nach Ebenenabzug (c) Messprofil nach Ebenenabzug ohne vorhandene Verkippung.

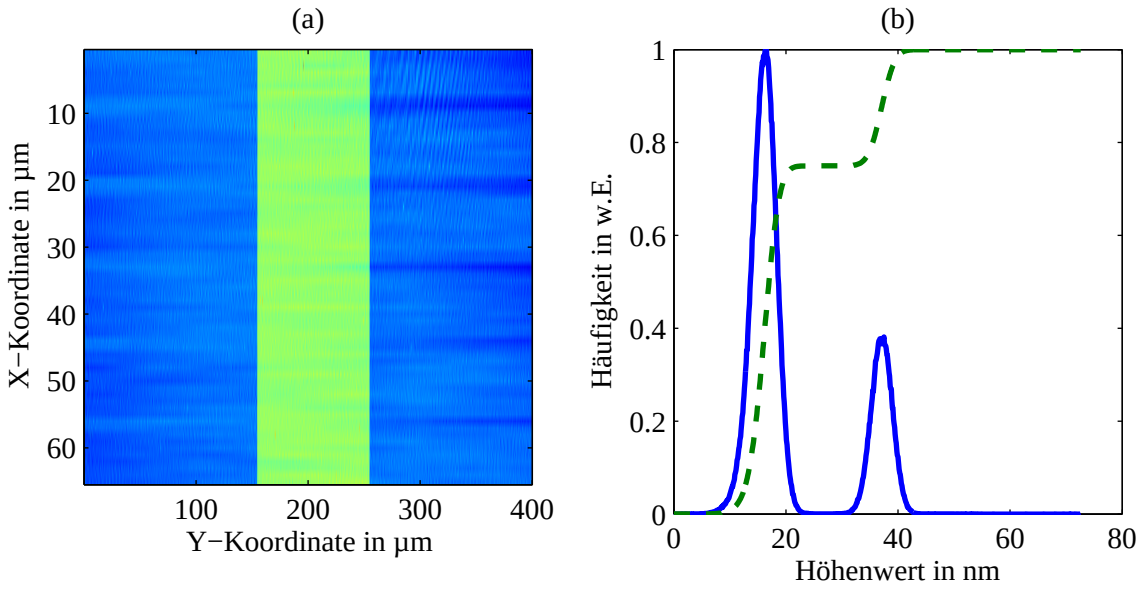


Abbildung 5.14: Messung einer $18{,}9\,\mathrm{nm}$ - VLSI Stufenhöhe: (a) Graphische Darstellung der Messdaten; (b) Auswertung mittels Histogramm-Methode (blau, durchgezogene Linie: Histogramm; grün, gestrichelte Linie: Integral der Höhenwert.

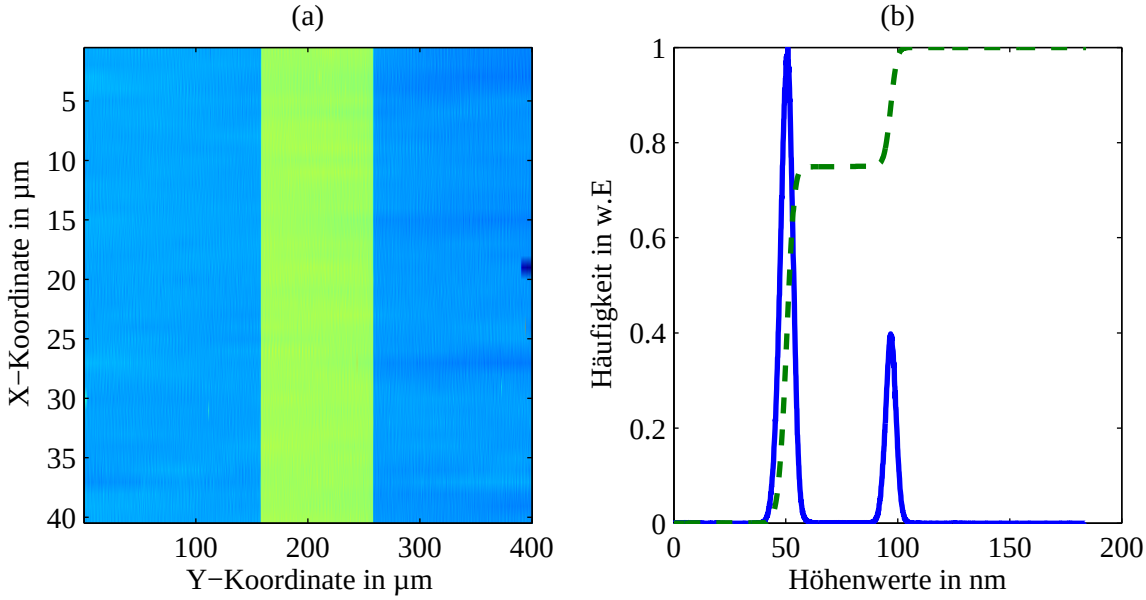


Abbildung 5.15: Messung einer $43{,}3\,\mathrm{nm}$ - VLSI Stufenhöhe: (a) Graphische Darstellung der Messdaten; (b) Auswertung mittels Histogramm-Methode (blau, durchgezogene Linie: Histogramm; grün, gestrichelte Linie: Integral der Höhenwert.

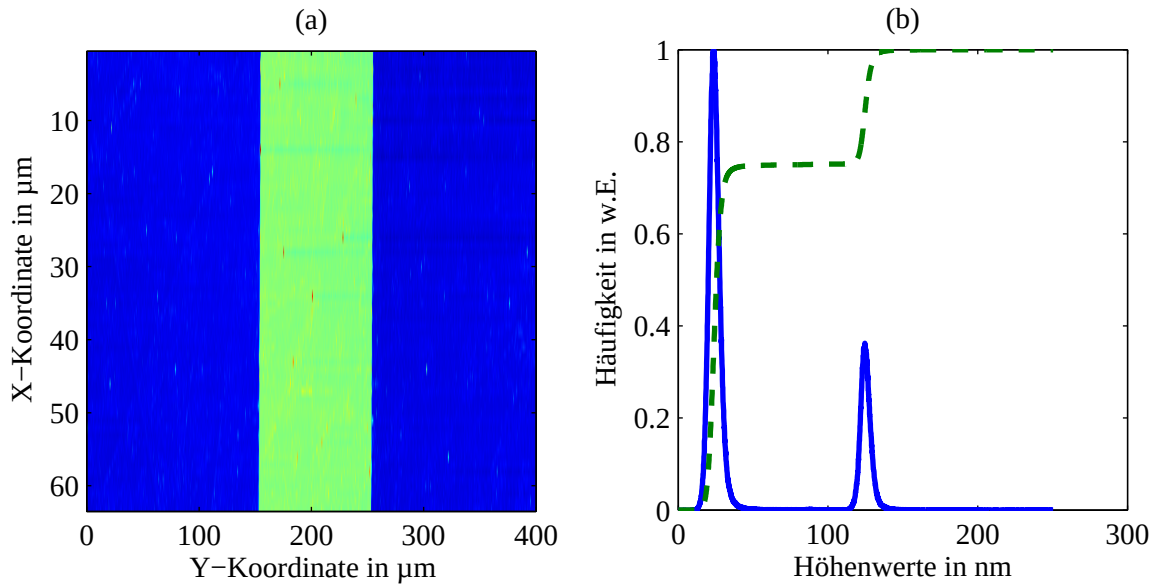


Abbildung 5.16: Messung einer $94{,}8\,\mathrm{nm}$ - VLSI Stufenhöhe: (a) Graphische Darstellung der Messdaten; (b) Auswertung mittels Histogramm-Methode (blau, durchgezogene Linie: Histogramm; grün, gestrichelte Linie: Integral der Höhenwert.

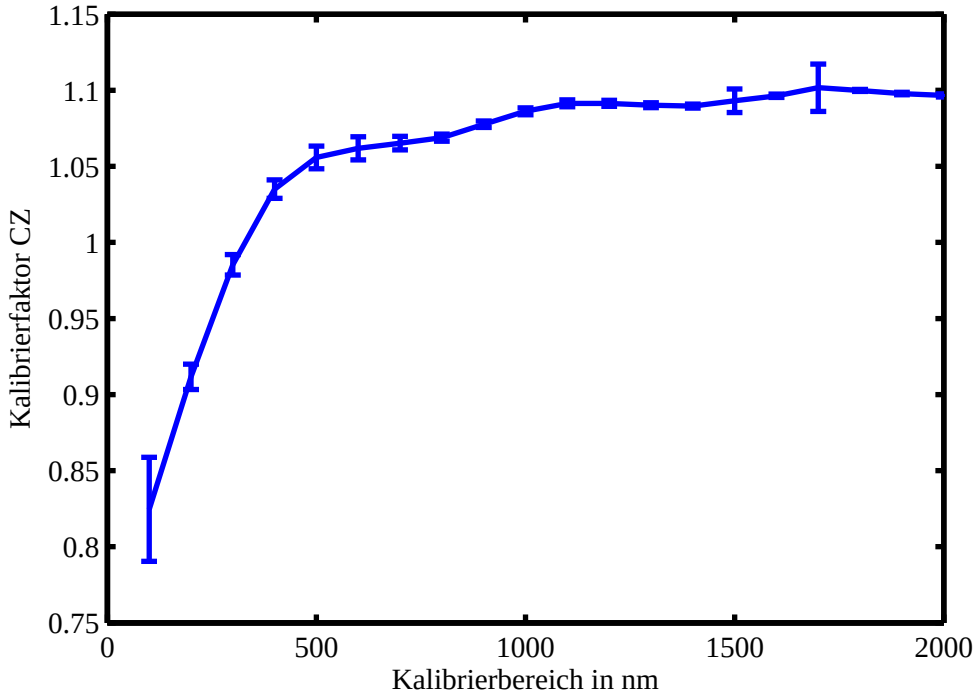


Abbildung 5.17: Messung der Nichtlinearität der Z-Achse (Konfidenzniveau von 95%).

Kapitel 6

Spezifische Messstrategien und Probleme der Nanometrologie

Durch die Umsetzung einer vorwissensbasierten AFM-Messung besteht nun die Möglichkeit spezifische Messstrategien und Probleme der Nanometrologie effizient zu untersuchen.

6.1 Kantenkriterien für die rastersondenbasierte Nanometrologie

In der optischen Koordinatenmesstechnik finden eindimensionale Kantenkriterien eine breite Anwendung bei der Extraktion von Messprimitiven. Dabei wird ein Messfeld über die zu extrahierenden Kontur platziert, welche in der optische Koordinatenmesstechnik als ein Sprung in der Intensität der Pixel zu erkennen ist. Eine vordefinierte Anzahl von sogenannten „Suchstrahlen“ wird in äquidistanten Abständen innerhalb des Messfeldes entlang der Kontur ausgewertet. Durch die Auswertung der Linienprofile der Suchstrahlen mittels Kantenkriterien werden die Kantenorte bestimmt. Mittels einer Ausgleichsrechnung können nun die Parameter der Kontur aus der Position der Kantenorte ermittelt werden. In der Nanometrologie wurden in vorherigen Arbeiten bereits Ansätze zum Einsatz von Kantenkriterien zur Konturextraktion vorgestellt [Hüs05]. In diesen Vorarbeiten wurden die Kantenorte durch Korrelation mit einer Musterkante, Ermittlung von statistischen Momenten, Bestimmung der photometrischen Mitte sowie durch Besteinpassung von unterschiedlichen geeigneten Funktionen ermittelt. Die herkömmlichen Kantenkriterien weisen alle im Bezug auf die Übertragbarkeit in die Nanometrologie eine fundamentale Schwäche auf. Sie beziehen die Verzerrung durch die Spitzengeometrie nicht in die Auswertung des Kantenortes ein. Aufgrund des endlichen Radius von normalen Cantileverspitzen sind große Bereiche eines Kantensprungs nicht erreichbar. Diese Bereiche stellen nicht die Probengeometrie, sondern größtenteils die Spitzengeometrie dar. Somit können diese Bereiche nur bedingt in die Bestimmung der Kantenorte einbezogen werden. Die in Kapitel 5.1 erläuterten Methoden zur morphologischen Rekonstruktion der Messoberfläche können die reale Messoberfläche nur bedingt rekonstruieren. Es verbleiben nicht rekonstruierbare Bereiche an sehr scharfen Kantenübergängen, welche bei

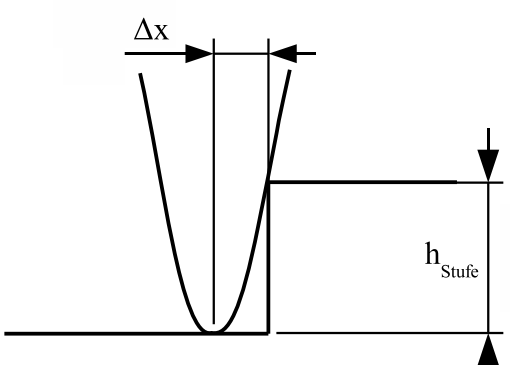


Abbildung 6.1: Systematischer Fehler bei der Bestimmung des Kantenortes.

Anwendung eines Kantenkriteriums auf die morphologisch entzerrte Oberfläche ebenfalls zu systematischen Fehlern führen. Bei den in dieser Arbeit verwendeten pyramidalen Cantileverspitzen ist nur eine Aussage über die Position der obersten Ecke eines scharfen Kantenübergangs möglich. Zur Berücksichtigung des systematischen Fehlers ist aus der Maskenmetrologie eine Methode namens „Tip width Subtraction“ bekannt (siehe Abbildung 6.1). Dabei wird der systematische Fehler Δx als Abstand des Apex vom aktuellen Berührungspunkt definiert. In der makroskopischen taktilen Koordinatenmesstechnik mit Kugeltastern treten ebenfalls systematische Fehler durch den Kugelradius auf. Diese Methode kann mit starken Änderungen auf die Messungen mit pyramidalen Spitzengeometrien übertragen werden. Aus diesem Zusammenhang lassen sich Kantenkriterien ableiten, welche den systematischen Fehler in korrekter Weise abschätzen:

1. Schwellwertkriterium
2. Korrelationskriterium
3. Besteinpassung mit subpixelgenauer Kantenortbestimmung

Schwellwertkriterium. Das Schwellwertkriterium ist ein einfaches und wenig robustes Kantenkriterium. Es findet jedoch aufgrund seiner einfachen Implementierung eine weite Verbreitung in der makroskopischen optischen Koordinatenmesstechnik. Ein einfacher Schwellwertalgorithmus bestimmt auf Basis der Histogrammmethode die Höhenwerte des oberen und des unteren Niveaus des Kantensprungs einen Schwellwert, welche den Höhenwert des gesuchten Kantenortes darstellt. Bereits bei leichter Verkippung der Probe entstehen großen Unsicherheiten bei der Bestimmung des Schwellwertes auf Basis der Histogrammmethode. Ebenfalls gehen Regelabweichungen am Kantensprung in die Bestimmung des Schwellwertes ein. In dieser Arbeit wird ein Algorithmus vorgestellt werden, welcher bereits durch eine erweiterte Auswertung gegenüber der Basisversion verbessert wurde. Der Algorithmus ist wie folgt implementiert:

1. Bestimmung der Spitzengeometrie mittels Blind-Tip-Estimation
2. Grobbestimmung des Kantenortes durch statistische Momente

3. Feinbestimmung des Schwellwerts anhand der Höhenwerte des unteren und oberen Niveaus nach Entfernung des gestörten Transitionsbereiches (vgl. DIN EN ISO 5436)

4. Feinbestimmung des Kantenortes durch lineare Suche des Schwellwertes (50%)

5. Korrektur des Kantenortes

Korrelationskriterium. Ein weiteres häufig verwendetes Kantenkriterium ist das Korrelationskritierum. Beim Korrelationskriterium wird die Korrelation zwischen dem Messprofil und einer Musterkante genutzt. Durch die Verschiebung der Musterkante über das Messprofil des Kantensprungs wird für jeden Punkt ein Korrelationskoeffizient berechnet. Das Maximum der Korrelationskoeffizienten entspricht dem Kantenort. Eine effiziente Implementierung nutzt das Konvolution-Theorem sowie das Fourier-Theorem zur Umsetzung einer Korrelation. Durch die Interpolation von Messprofil und Muster erfolgt eine subpixelgenaue Bestimmung des Kantenortes. Im Normalfall handelt es sich bei dem verwendeten Muster um eine ideale Sprungfunktion. Durch die Verzerrung der Messoberfläche ist die Anwendung einer idealen Sprungfunktion nicht möglich. Als Musterkante muss eine durch eine Dilation mit der Spitzengeometrie verzerrte Sprungfunktion verwendet werden. Die korrekte Position des Kantenortes kann direkt über den Orte mit des maximalen Korrelationskoeffizienten bestimmt werden. Der Algorithmus wird wie folgt implementiert:

1. Bestimmung der Spitzengeometrie mittels Blind-Tip-Estimation

2. Korrelation des Kantenprofils mit einer durch Dilatation mit der Spitzengeometrie verzerrten Sprungfunktion

3. Bestimmung des Kantenortes als Maximum der Korrelation

Besteinpassung einer Musterkante zur subpixelgenauen Kantenortbestimmung. Unter Verwendung der L_1-Norm erfolgt eine Besteinpassung einer Musterkante. Zur Generierung der Musterkante wird zuerst eine Sprungfunktion mit einer Stufenhöhe h und dem Ort des Kantensprungs x unter einer Verkippung α erzeugt. Die Musterkante wird durch einen Dilatation der Sprungfunktion mit der Spitzengeometrie generiert. Auf Basis der L_1-Norm werden die Parameter h, x und α iterativ an das Messprofil angenähert. Das Optimierungsergebnis stellt den korrekten Kantenort dar.

1. Bestimmung der Spitzengeometrie mittels Blind-Tip-Estimation

2. Bestimmung der Stufenhöhe mittels Histogrammmethode als Startparameter

3. Besteinpassung einer morphologisch verzerrten Sprungfunktion der Form $P = f(x,h,\alpha)$ mit x als zu bestimmende Kantenposition, h als Stufenhöhe der Kante sowie α als Verkippung des Kantenprofils mittels eines Optimierungsalgorithmus

Vergleich der Kantenkriterien. Im Vergleich der Kantenkriterien untereinander ist das dritte Kantenkriterium, die Besteinpassung einer Musterkante, methodisch gesehen das beste Kriterium, da es im Gegensatz zu den anderen Kantenkriterien die Verkippung des Kantenprofils in die Auswertung einbezieht. Bei allen drei Kantenkriterien ist die exakte Kenntnis der Spitzengeometrie Voraussetzung für die Ermittlung des systematischen Fehlers. Wird Spitzengeometrie mittels Blind-Tip-Estimation gewonnen, dann gehen die Störgrößen des Systems bereits in die Abschätzung der Spitzengeometrie und damit in die Bestimmung des systematischen Fehlers ein. Die Auswirkung von Störgrößen auf die Ermittlung der Spitzengeometrie wurde bereits durch **Villarubia** [Vil97] untersucht. So führt eine Tiefpassfilterung des Messsignals zu einer Verbreiterung der ermittelten Spitzengeometrie. Das Vorhandensein von Rauschen im Messsignal führt zu einer Verschlankung der ermittelten Spitzengeometrie. Beide Faktoren sind im gegenwärtigen System vorhanden. Für die exakte Abschätzung der Spitzengeometrie ist es notwendig, dass die Übertragungsfunktion des Rasterkraftmikroskops eine ausreichende Bandweite und Glätte besitzt, um die Ortsfrequenzen der Messoberfläche vollständig abzubilden. Ohne die Durchführung der Umbaumaßnahmen zur Verbesserung der metrologischen Eigenschaften des Systems (siehe Ausblick Kapitel 7) ist eine korrekte Bestimmung des systematischen Fehlers nicht gegeben.

Auswirkungen der Spitzengeometrie. In der makroskopischen Koordinatenmesstechnik werden meist Kugeltaster zum Antasten der Messoberfläche genutzt. Aufgrund des Durchmessers der Tastkugel treten charakteristische systematische Messfehler auf, welche durch eine Kalibrierung der Tastkugel zum großen Teil beherrscht werden können. Die Oberflächenrauheit und nicht kalibrierte Formabweichungen der Tastkugel gehen direkt in die Messunsicherheit ein. Bei dem vorliegenden Rasterkraftmikroskop sind die durch die pyramidale Spitzengeometrie auftretenden Messfehler ungleich komplexer und können teilweise nicht beherrscht werden. Wird das Konzept der Suchstrahlen zur Messung von Geometrieelementen genutzt, so ergibt sich die Problematik, daß der systematische Fehler abhängig von der Krümmung der zu messenden Kontur ist. Die Krümmung der Kontur ist jedoch ebenso wie die Lage der Kontur während der Messung unbekannt. Für eine stark gekrümmte Kontur ist es somit bei der Messung mit pyramidalen Messspitzen nicht möglich den genauen Kantenort auf Basis der Kantenkriterien zu bestimmen. Allein für die Messung von Konturen mit einer vernachlässigbar kleinen Krümmung, wie z.B. für Geraden oder Kreisen mit großen Radien, ist es möglich den systematischen Fehler schon innerhalb des Kantenkriteriums exakt zu bestimmen (siehe Abbildung 6.2, 6.3). Die Messung von Strukturen mit stark gekrümmter Kontur kann nur im Rahmen eines hoch aufgelösten Rasterscans mit nachfolgender morphologischer Rekonstruktion erfolgen. Grundsätzlich kann das Problem der Spitzengeometrie nur durch die Nutzung einer wohl definierten Messspitze gelöst werden. Durch den Einsatz einer runden, symmetrischen und wohl definierten Spitzengeometrie ist der systematische Messfehler bei der Antastung von Kanten unabhängig von der Antastrichtung und der Krümmung der Kontur. Diese Anforderungen werden durch Cantilever für die Messung kritischer Dimensionen (engl.: critical dimension (CD)) erfüllt. Durch CD-Messspitzen ist die Messung von senkrechter Seiten-

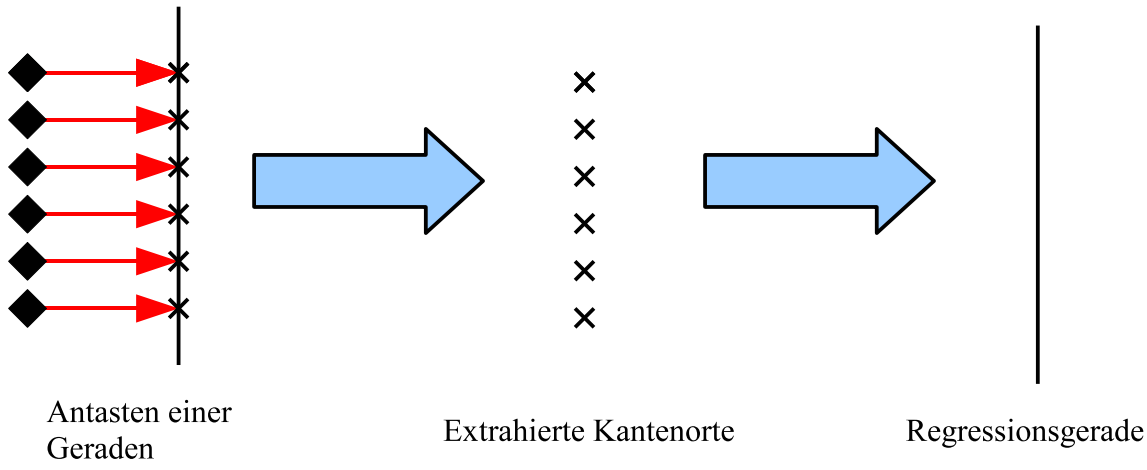


Abbildung 6.2: Messung einer Gerade (vereinfachte Darstellung).

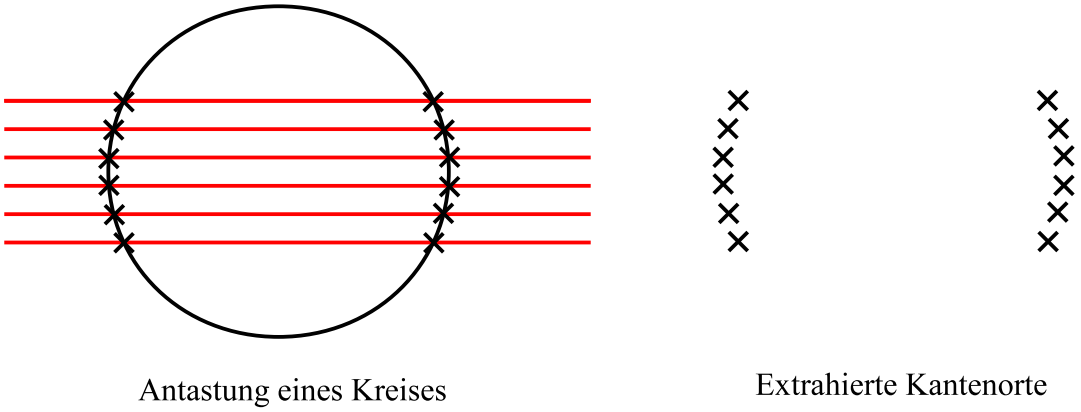


Abbildung 6.3: Messung eines Kreises (vereinfachte Darstellung).

wänden von Kanten möglich. Die Verwendung solcher Cantilever benötigt jedoch für ihren Einsatz eine bestimmte Aktorik und Ansteuerung (siehe Zusammenfassung und Ausblick - Kapitel 7).

6.2 Effiziente Messung von Messprimitiven und großflächigen Messarealen

Zur Messung von Messprimitiven wurde ein modulares System aufgebaut. Komplexe Messelemente (z.B. ein Rechteck) werden auf Basis von einfachen Messelementen (z.B. Geraden beziehungsweise Kantenpunkten) dargestellt und gemessen. Das Grundelement jedes komplexen Messelements ist ein Linienscan mit Kantenortbestimmung mittels eines Kantenkriteriums. Dieses Messstrategie ist dem Prinzip der Suchstrahlen aus der optischen Koordinatenmesstechnik angelehnt. Zur Messung von zweidimensionalen Messelementen ergeben sich aufgrund des seriellen Messprinzips zwei mögliche Messstrategien (siehe Abbildung 6.4):

1. Linienscan (Messung mit nur einer Antastrichtung)

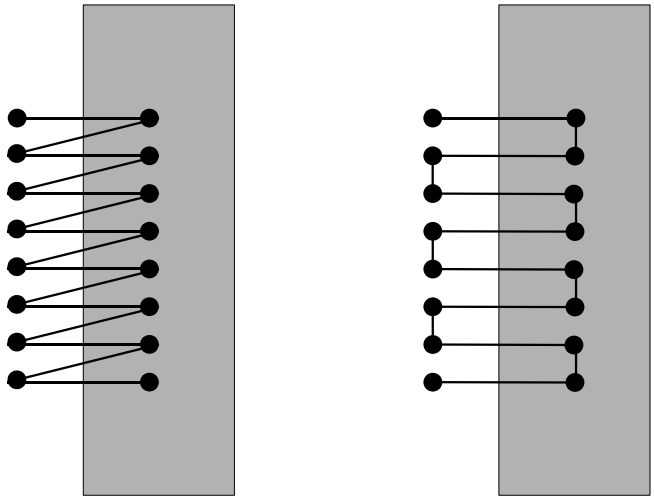


Abbildung 6.4: Graphische Darstellung von Linienscan (links) und Mäanderscan (rechts).

2. Mäanderscan (Messung in Hin- und Rückrichtung)

Die einfachste vom Rasterscan abgeleitete Messstrategie ist der Linienscan. Eine Kante wird von nur einer Messrichtung angetastet. In der Rückrichtung zum Startpunkt des nächsten Linienscans erfolgt keine Messung, da die Bewegungstrajektorie in der Rückrichtung schräg zur Kante verläuft. Beim Mäanderscan wird die Kante alternierend in beiden Messrichtungen gemessen. Der Vorteil des Mäanderscan ist, dass die Rückrichtung ebenfalls zur Gewinnung von Messdaten genutzt wird. Auf diese Weise kann die Messgeschwindigkeit bei gleichem Messlinienabstand näherungsweise verdoppelt werden. Für die Auswertung der Kantenprofile ist der Wechsel der Antastrichtung problematisch, da einige systematische Fehler abhängig von der Antastrichtung sind. Hin- und Rückrichtung müssen bei Auswertung der Messdaten gesondert behandelt werden. Mit Hilfe der in Abschnitt 6.1 definierten Kantenkriterien werden die Kantenorte innerhalb der Linienscan bestimmt. Auf Basis der gewonnenen Kantenorte werden durch lineare Regression die Parameter der Messelemente ermittelt. Durch den Einsatz der Hauptkomponentenanalyse und den Einsatz von Gütekriterien zur Ausreißererkennung wird die Unsicherheit der Regressionsparameter verringert (siehe Abschnitt 6.3).

Bei konventionellen Rasterkraftmikroskopen ist der Rasterscan die gängige Messstrategie (siehe Abbildung 2.8). Im Rahmen des modularen Aufbausystems der Messelemente wird ein Rasterscan durch äquidistant versetzte Linienscans implementiert. Aufgrund der Entkopplung der Bewegungsachsen ergeben sich für die NCMM verschiedene Möglichkeiten zur Modifikation der ursprünglichen Messstrategie. Bei konventionellen Rasterkraftmikroskopen ist das quadratische Messfeld prinzipbedingt mit seinen Hauptachsen entlang der lateralen Bewegungsachsen des Rasterkraftmikroskops angeordnet. Während die Abtastrate bei konventionellen Rasterkraftmikroskopen in der schnellen und in der langsamen Messachse identisch ist, können beide Abtastraten bei der NCMM getrennt gesetzt werden. Bei der NCMM besteht die Möglichkeit das Messfeld in einem beliebigen Winkel zum Maschinenkoordinatensystem der NCMM zu drehen (siehe Abbildung 6.5 links).

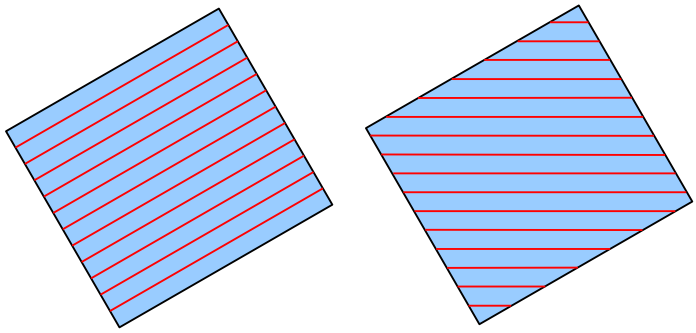


Abbildung 6.5: Modifizierte Rasterscan: Gedrehtes Messfeld mit gedrehten Messlinien (links), Gedrehtes Messfeld mit Messlinien entlang der Y-Achse der NCMM (rechts).

Auch können beliebige Abmaße für das Messfeld gewählt werden. Die Führungen und Antriebe der NCMM sind in ihrer mechanischen Ausführung übereinander gestapelt. Die unterste Ebene ist die X-Achse, darüber sind die Y- und Z-Achse angeordnet. Im Rahmen einer Reduktion der Messunsicherheit ist es sinnvoll, die unterste Bewegungsachse, die X-Achse, als langsame Scanachse und die darüber liegende Y-Achse als schnelle Scanachse zu nutzen. Diese Vorgehensweise wird ebenfalls für gedrehte Messfelder implementiert (siehe Abbildung 6.5 rechts).

6.3 Gütekriterien zur Detektion von Ausreißern

Im Sonderforschungsbereich 622 der Technischen Universität Ilmenau wurde eine Gütekriterium für die Einschätzung der metrologischen Auswertbarkeit und der Antastunsicherheit eines Kantenortes bei einer optischen Koordinatenmessung entwickelt [TL07]. Das grundsätzliche Prinzip dieses Verfahren kann auf die Messungen mit Rasterkraftmikroskopen übertragen werden. Allerdings sind Unterschiede zwischen den beiden Messprinzipen zu beachten. Es wurde ein Großteil der Notation von *Töpfer et. al.* übernommen. Bei dem Gütekriterium aus der optischen Koordinatenmesstechnik wird das Signal-Rausch-Verhältnis der Messdaten, die Breite des Transitionbereiches zwischen unteren und oberen Grauwertniveau, der maximale Anstieg der Kante, die Einzigartigkeit des Schwellwertes und die Kantenform bewertet. Bei der Ermittlung des Qualitätsfaktors Q_R zur Einschätzung des Signal-Rausch-Verhältnisses werden die empirischen Standardabweichungen des oberen und des unteren Niveaus des Kantenüberganges gemittelt und durch die Anzahl der Quantisierungstufen des Bildsensors geteilt. In ähnlicher Weise kann das Signal-Rausch-Verhältnis für eine rastermikroskopische Messung definiert werden (siehe Tabelle 6.1). Allerdings wird das Signal-Rausch-Verhältnis im Gegensatz zur optischen Messtechnik durch das dynamische Z-Rauschen des Rasterkraftmikroskops normiert. Der Qualitätsfaktor Q_B zur Einschätzung der Breite der Transition zwischen unteren und oberen Niveau des Kantenüberganges stellt bei AFM-Messungen kein eigenständiges Kriterium dar, da es mit dem Anstieg der Kante aus regelungstechnischer Sicht gekoppelt ist. Der Qualitätsfaktor Q_A zur Bewertung des Anstieg der Flanke ist für eine rastermikroskopsiche Messung in Hinblick auf die Einschät-

Tabelle 6.1: Gütekriterium für Kantenübergänge in der Nanometrologie.

Qualitätskriterium	Formeln(Rasterkraftmikroskopie)
globales Kriterium	$Q_K = \sum_{i=1}^{n} f_i \cdot Q_i \qquad \sum_{i=1}^{n} f_i = 1 \qquad Q_i = [0 \ldots 100]$
dynamisches Rauschen	$Q_R = \left(\frac{S_I}{ZR} - 1\right) \qquad s_I = \frac{1}{2} \cdot s_{I,unten} + \frac{1}{2} \cdot s_{I,oben}$
Flankensteilheit	$Q_A = \left(\frac{arctan(h'_{max}) - \frac{\alpha}{2}}{90 - \frac{\alpha}{2}}\right) \cdot 100 \qquad h'_{max} = \left[max(\frac{dh}{dl})\right]_{l_1}^{l_2}$
Einzigartigkeit	$Q_E = \begin{cases} 100: & t \geq 3 \\ 50: & t \geq 2 \\ 0: & t = 1 \end{cases} \quad t \in Z \text{ und } t \geq 1 \quad t = \sum_{l_0}^{l_3} \Gamma(h(l)) \quad \Gamma(h(l)) = \begin{cases} 0: & h(l) \neq \bar{h}_E \\ 1: & h(l) = \bar{h}_E \end{cases}$
Kantenform	$Q_F = 100 \cdot \lvert 1 - \psi_{max} \rvert \qquad \psi_{KM}(\Delta) = \int_{l_0}^{l_3} h(l) M(l - \Delta) dl$ $\psi_{max} = [max(\psi_{KM}(\Delta))]_{l_0}^{l_3} \qquad M = \delta(l)$
Überschwingweite	$Q_U = \begin{cases} 0: & \frac{h_{max} - h_{oben}}{\beta \cdot h_{Stufe}} \leq 1 \\ \left(\frac{h_{max} - \bar{h}_{oben}}{\beta \cdot h_{Stufe}} - 1\right) \cdot 100: & \frac{h_{max} - \bar{h}_{oben}}{\beta \cdot h_{Stufe}} > 1 \\ 100: & \frac{h_{max} - \bar{h}_{oben}}{h_{Stufe}} \geq 1 \end{cases}$

Legende:

l	Längenkoordinate des Höhenprofils	Γ	Schwellwertfunktion
α	Öffnungswinkel der Cantileverspitze	s_I	empirische Standardabweichung
$h(l)$	Höhenwerte des Höhenprofils	$\bar{h}_E$	Schwellwert
f_i	Gewichtungsfaktoren	M	Referenzmuster
ZR	dynamisches Z-Rauschen	Δ	Verschiebung zwischen h(l) und M
h_{max}	Maximaler Höhenwert des Höhenprofils	δ	Dirac-Impuls
h'_{max}	Maximaler Anstieg	Ψ	Kreuzkorrelation zwischen h(l) und M
l_0	Beginn der Messlinie	l_3	Ende der Messlinie
l_1	Beginn der Transition zwischen oberen und unteren Höhenniveau		
l_2	Ende der Transition zwischen oberen und unteren Höhenniveau		
β	optimaler Anteil des Überschwingens an der Stufenhöhe		

zung der Güte der Reglereinstellung relevant. Bei einer rastermikroskopischen Messung wird an Kanten die Geometrie der Messspitze abgewickelt. Dies geschieht dadurch, dass der proximale Punkt, der Punkt der der Oberfläche am nächsten ist, vom Apex, dem Ende der Messspitze, weg wandert (siehe Abb. 6.6). Aus diesem Grund kann der maximale Anstieg bei unkorrigierten Messdaten nur dem Tangents des halben Öffnungswinkels der Messspitze entsprechen. Daraus folgt die Formel für Einschätzung der Flankensteilheit (siehe Tabelle 6.1). l_1 und l_2 sind die Punkte, welche ausgehend vom Kantenort zuerst innerhalb der Konfidenzintervalle der Mittelwerte des unteren beziehungsweise oberen Niveaus des Kantenüberganges liegen. Es kann bei rasterkraftmikroskopischen Messungen zum mehrfachem Durchgang des Schwellwertes innerhalb eines Kantenüberganges kommen. Dieses Verhalten macht die Bestimmung des Kantenortes unmöglich. Aus diesem Grund kann das Kriterium zur Einzigartigkeit Q_E des Schwellwertes uneingeschränkt übernommen werden. Trotz des Umstandes der Abwicklung der Spitzengeometrie bei AFM-Messungen, welche die Form der Kante bei unkorrigierten Messdaten verfälscht, ist das Kriterium zur Kantenform Q_F ebenfalls uneingeschränkt zu übernehmen. In der optischen Messtechnik stellt der Kantenübergang einen Sprung in den gemessenen Intensitätswerten dar. Bei AFM-Messung

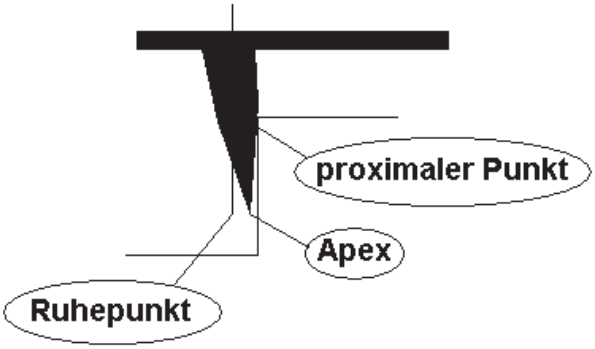


Abbildung 6.6: Abwicklung der Geometrie der Messspitze.

ist das Messsignal, der Verlauf des Stellsignales des Reglers, welches bei der Verfolgung der Oberfläche generiert wird. Aus diesem Grund wird ein zusätzliches Kriterium Q_F zur Evaluierung des Überschwingverhaltens des Reglers eingesetzt. Ist die Überschwingweite kleiner als der Anteil β an der Stufenhöhe, so ist der Regler optimal eingestellt. Ist die Überschwingweite größer als der Anteil β an der Stufehöhe und kleiner als die Stufenhöhe selber, so bewegt sich der Wert des Gütekriteriums im Bereich zwischen 0 und 100. Bei einer Überschwingweite größer oder gleich der Stufenhöhe nimmt das Kriterium den Wert 100 an.

Ein anderer Weg zur Detektion von Ausreißern ist die Hauptkomponentenanalyse (engl.: Principal Component Analysis, kurz PCA) [Pea01]. In der Vergangenheit wurde ein Matrixformalismus der PCA genutzt, um Trends in AFM-Messdaten zu entfernen [RDJ94]. Am folgenden Beispiel wird eine Kombination aus dem Gütekriterium Q_K und der PCA genutzt, um Ausreißer beim Anpassung einer Gerade an eine Kante zu detektieren. Die Messdaten in Abbildung 6.7 wurden mit einer Messgeschwindigkeit von $5\,\mu\mathrm{m/s}$, einem Messlinienabstand von $1\,\mu\mathrm{m}$ und einem Messpunktabstand von $5\,\mathrm{nm}$ gemessen. Um die Unsicherheit der Regressionsparameter zu reduzieren, müssen Ausreißer aus den Messdaten entfernt werden. Zuerst wir die PCA genutzt, um stark gestörte Messlinien zu entfernen. In einer idealen Messung hat der Eigenwert der ersten Hauptkomponente λ_1 den Wert n, die Anzahl der identischen Messlinien. Das Auftreten von Ausreißern und Artefakten reduziert die Wert. Für die Messdaten (siehe Abbildung 6.7) mit 100 Messlinien ist der Eigenwert der ersten Hauptkomponente (PC) ist 91.84. Ein Indikator für die Korrelation zwischen der i-te Messlinie und der ersten PC ist das i-te Element der ersten PC. Die Messlinien, die der erste PC zugehören, haben ungefähr den Wert $\frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} = 0.1043$. Die Messlinien 86-88 und 93-100 zeigen signifkante Störungen und werden durch die PCA aus den Messdaten entfernt. Im nächsten Schritt wird die Kantenposition in jeder Messlinie mittels eines Korrelationskriteriums bestimmt. Ebenfalls wird das Gütekriterium Q_K mit $\beta = 0.03$ und $\alpha = 0$ für jede Messlinie berechnet. Das Gütekriterium zeigt, dass einige Ausreißer auch nach der PCA vorhanden sind (siehe Abbildung 6.8). In diesem Beispiel wurden alle Messlinien mit einem Q_K gleich oder höher als 2.5 ausgeschlossen. Nach der Bereinigung des Messdatensatzes von Ausreißern werden die Regressiongeraden an die Messdaten angepaßt. Abbildung 6.9 zeigt die Messdaten und die Regressionsgeraden mit und ohne

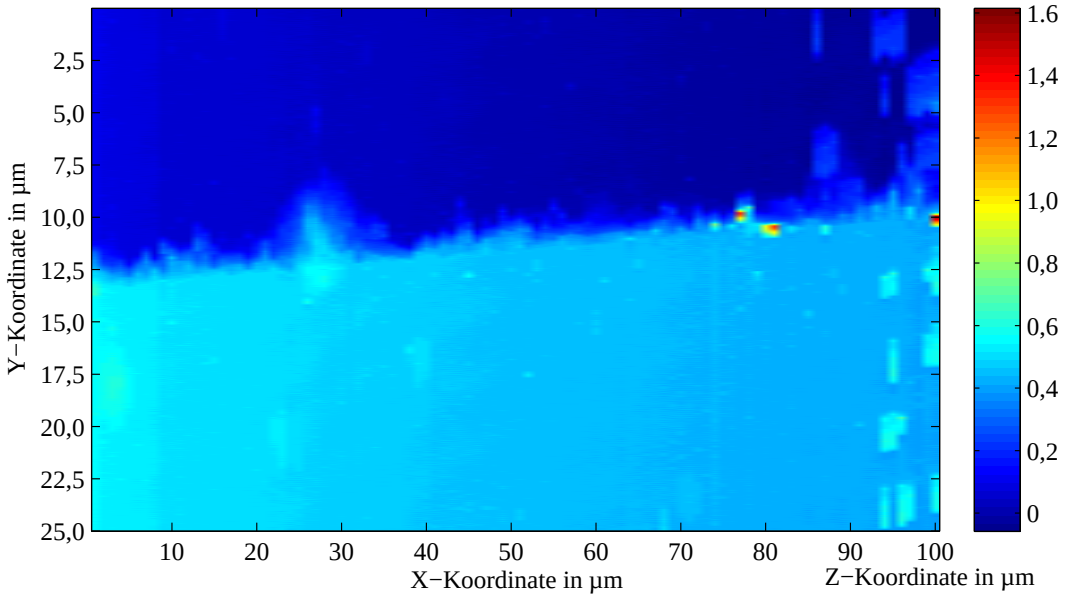


Abbildung 6.7: AFM-Messung (Größe: $100 \times 25\,\mu\mathrm{m}$) einer VLSI $450\,\mathrm{nm}$ Stufenhöhe.

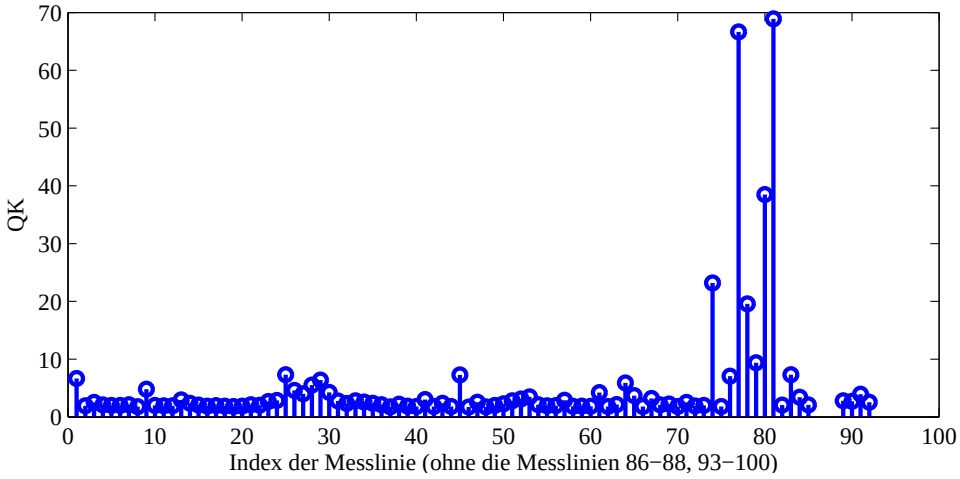


Abbildung 6.8: Graphische Darstellung des Qualitätskriteriums Q_K.

auf Q_K-basierender Ausreißerentfernung. Die Regressionsparameter (β_0, β_1) der Regressionsgeraden und ihre Unsicherheit (für ein Konfidenzniveau von 95%) werden bestimmt (siehe Tabelle 6.2). Die Regressionsparameter zeigen eine signifikante Verbesserung der Unsicherheit durch die Anwendung des Gütekriteriums Q_K.

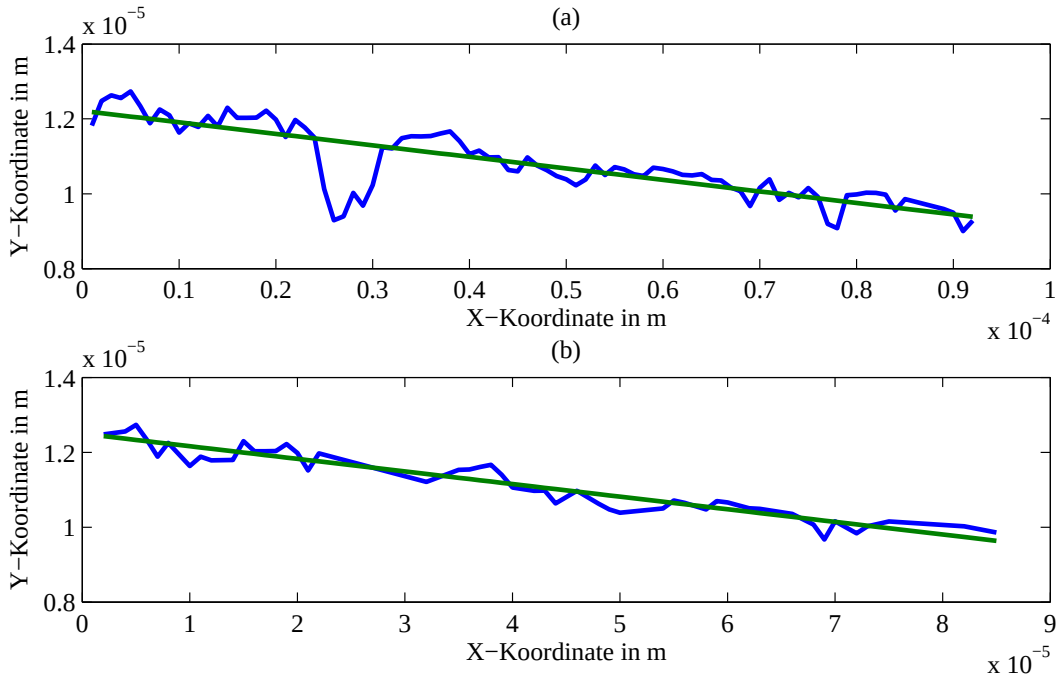


Abbildung 6.9: Berechnung der Regressionsgeraden: (a) Lineare Regression nach PCA-Ausreißerentfernung (b) Lineare Regression nach Ausreißerentfernung mittels PCA und Q_K.

Tabelle 6.2: Parameter der Regressionsgerade und ihre Unsicherheit.

Parameter	lineare Regression nach PCA	lineare Regression nach PCA und Q_K
β_0	$1.2215 \cdot 10^{-5} \pm 4.7377 \cdot 10^{-6}$	$1.2497 \cdot 10^{-5} \pm 3.5119 \cdot 10^{-6}$
β_1	$-0.0308 \pm 3.5119 \cdot 10^{-9}$	$-0.0337 \pm 2.5286 \cdot 10^{-9}$

6.4 Fallbeispiel: Messungen von Poren einer Nanofiltrationsmembran

Der Trägerchip der gemessenen Nanofiltrationsmembranen hat eine schachbrett-ähnliche Struktur (siehe Abbildung 6.10). Marker in Form von Buchstaben und Zahlen dienen zur Adressierung jedes einzelnen Membranfeldes. Die Membranfelder bestehen aus Nanoporen mit einem Durchmesser von ca. $350\,\mathrm{nm}$. Die Nanoporen sind in einer rechteckigen Gitterstruktur mit einem Pitch von $2\,\mu\mathrm{m}$ in beiden Dimensionen anordnet. Jedes Membranfeld besitzt 48116 Nanoporen auf einer Fläche von $100 \times 2100\,\mu\mathrm{m}^2$. Eine vollständige Charakterisierung der Poren konnte mit bekannter Messtechnik nicht durchgeführt werden. Die Poren sind zu klein für optische Messtechniken wie die Lichtmikroskopie und die Weißlichtinterferometrie. Für die Untersuchung mit Rasterelektronenmikroskopen müssen die Proben präpariert werden. Das heißt sie müssen mit einer dünnen Metallschicht versehen werden. Es besteht die Notwendigkeit Schnitte der Probe anzufertigen. Die Präparation ändert die Eigenschaft die Probe und ist nicht zerstörungsfrei. Rasterelektronenmikroskopie ist nicht rückführbar auf die Meterdefinition und kann nur kleine Messbereiche abdecken. Konventionelle Rasterkraftmikroskope haben nur einen kleinen Messbereich von $150 \times 150\,\mu\mathrm{m}^2$ und eine geringe Positionierwiederholbarkeit. Die einzigste verbleibende Option ist die Verwendung eines metrologischen Rasterkraftmikroskops für großflächige Messungen wie der NCMM.

In vorangegangenen Arbeiten zeigten sich Probleme bei der Orientierung auf der Probenoberfläche und durch den Verschleiß der Cantileverspitze. Es konnten keine quantitativen Aussagen über die Nanofiltrationsmembranen gewonnen werden [Gru09]. Auf Basis der in Kapitel 4 erarbeiteten Methoden ist es nun möglich jedes einzelne Membranfeld zu adressieren und automatisch zu messen. Als Orientierung dienen die auf der Probe bereits vorhandenen schachbrettartigen Markerstrukturen. Der grundsätzliche Ansatz zur Lösung des Verschleißproblems ist, nicht die gesamte Oberfläche in Form eines Rasterscans zu messen, sondern die einzelne Poren stichprobenartig zu messen. Die Nanoporen sind optisch nicht als Einzelmerkmal zu differenzieren, sondern stellen

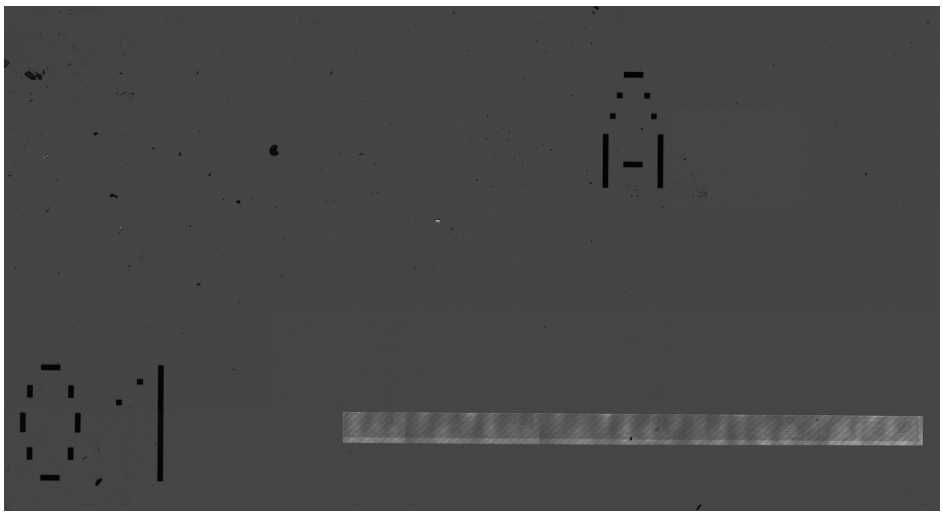


Abbildung 6.10: Mikroskopbild der Nanofiltrationsmembran (Größe: 1,8 x 3,4 mm).

sich vielmehr als eine Änderung der Oberflächentextur dar. Aus diesem Grund ist nicht möglich einzelne Poren direkt optisch zu lokalisieren und mit dem AFM zu messen. Es wurden vier unterschiedliche Messstrategien entwickelt, um das Problem zu lösen. Die vier unterschiedlichen Messstrategien bilden gleichzeitig die Genese bis zur Problemlösung ab. In einer ersten Messstrategie wird zur Lokalisation des Messfeldes zuerst die äußere Ecke der Membranfläche gemessen, um die Position und Ausrichtung des Gitters zu bestimmen (siehe Abbildung 6.11a). Durch eine Segmentierung der AFM-Messdaten mittels eines Schwellwertkriteriums werden die Nanoporen extrahiert (siehe Abbildung 6.11b). Durch die Anwendung der Schwerpunkt-Methode auf die extrahierten Nanoporen werden deren Schwerpunkte ermittelt (siehe Abbildung 6.11c). Die Ermittlung der Orientierung erfolgt über die Gewinnung der Hauptachsen des Gitters durch eine Hauptkompontenanalyse der resultierenden Punktwolke (siehe Abbildung 6.11d). Auf Basis der Hauptachsen und der Koordinaten der Schwerpunkte kann ein lokales Koordinatensystem zur Messung der einzelnen Poren aufgebaut werden. In der praktischen Anwendung zeigt sich, dass es aufgrund von Drift und Verschleiß der Messspitzen nicht möglich ist, einzelne Poren auf diese Art und Weise zu adressieren. In einer zweiten Messstrategie werden nach der Bestimmung der Ausrichtung und Position des Gitters kompletten Spalten oder Zeilen von Nanoporen mit einem Sicherheitsbereich gemessen. Diese Strategie ist hinsichtlich des Verschleißes Rasterscans nur wenig überlegen, allerdings können einzelne Spalten oder Zeilen sicher adressiert werden. In einer dritten Strategie werden ohne exakte Lokalisation des Gitters zufällige, gleich große Messelemente innerhalb der Membranfläche gemessen und die Poren im Post-Processing extrahiert. Auf Basis der extrahierten Nanoporen wurde zur Darstellung des Sachverhaltes eine Oberflächenkarte erstellt (siehe Abbildung 6.12).

Keine der drei entwickelten Messstrategien kann die Anforderungen hinsichtlich der Reduktion des Verschleißes der Cantileverspitzen vollständig erfüllen. Aus diesem Grund wurde eine Algorithmus mit einer adaptiver Abtastrate entwickelt. Bei der Messung einer rechteckigen Fläche mittels eines Rasterscans wird die Oberfläche durch parallele, versetzte Messlinien abgetastet. Daraus resultieren zwei Abtastraten innerhalb eines Messdatensatzes, die Abtastrate innerhalb einer Messlinie und die Abtastrate senkrecht zu den Messlinien. Das Abtastintervall senkrecht zu den Messlinien ist durch den Versatz der Messlinien gegeben. Bestehen große Zwischenräume zwischen den zu messenden Merkmalen und ist eine vollständige Lokalisation nicht möglich, so ist eine automatische Anpassung der Abtastrate sinnvoll. Der Algorithmus kennt zwei Zustände, den Suchmodus und den Messmodus. Beim Start einer Messung mit adaptiver Abtastraste wird der Algorithmus im Suchmodus mit einem groben Abtastintervall initialisiert. Wird im Suchmodus ein Merkmal durch das vordefinierte Kriterium gefunden, so wechselt der Zustand des Algorithmus in den Messmodus. Im Messmodus wird mit einem feineren, vordefinierten Abtastintervall das Merkmal gemessen. Ist die Messung des Merkmals abgeschlossen, so wird im Suchmodus weiter gemessen bis zum Erreichen des nächsten Merkmals oder des Rands des Messfeldes. Um ein Merkmal beziehungsweise auch dessen direkte Umgebung zwecks Segmentierung sicher zu erfassen, misst der Algorithmus ebenfalls einen Bereich vor und nach einem detektierten Merkmal im Messmodus. Durch die Anwendung des Algorithmus kann bei der Messung von Nanoporen (Pa-

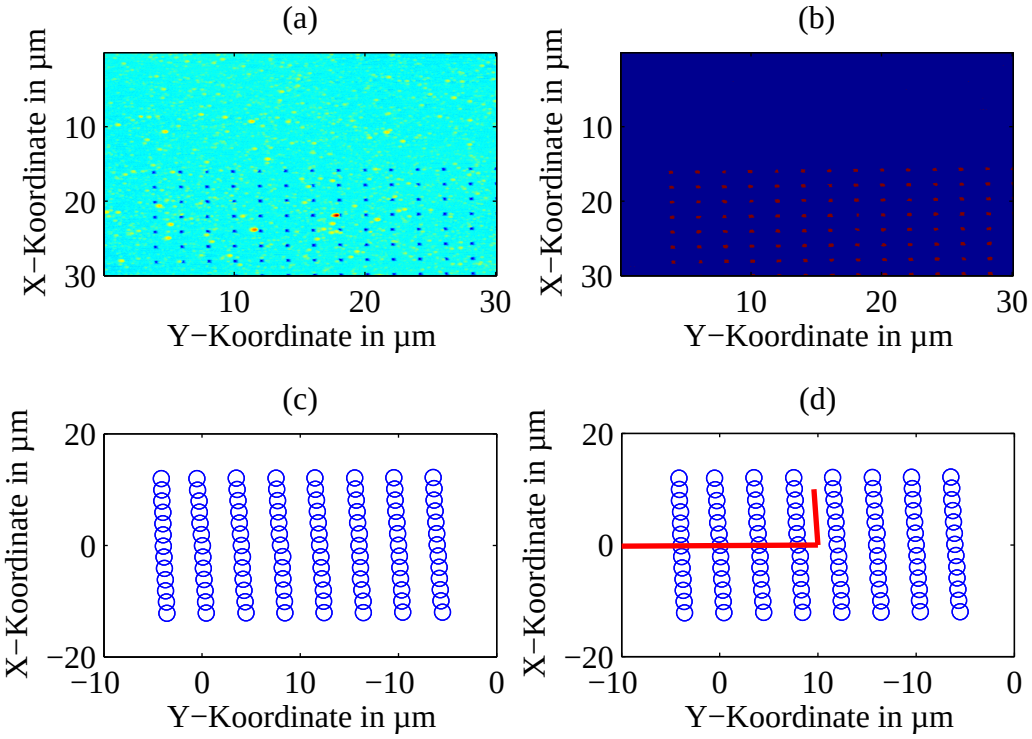


Abbildung 6.11: Bestimmung der Position und Orientierung des Membranfeldes: (a) AFM-Messung der Nanoporen ($30\,\mu\mathrm{m} \times 30\,\mu\mathrm{m}$; Auflösung: $50\,\mathrm{nm}$) (b) Extraktion der Poren mit Schwellwertmethode nach Detrending (c) Bestimmung der Schwerpunkte der Poren (d) Bestimmung der Hauptachsen des Gitters mittels PCA.

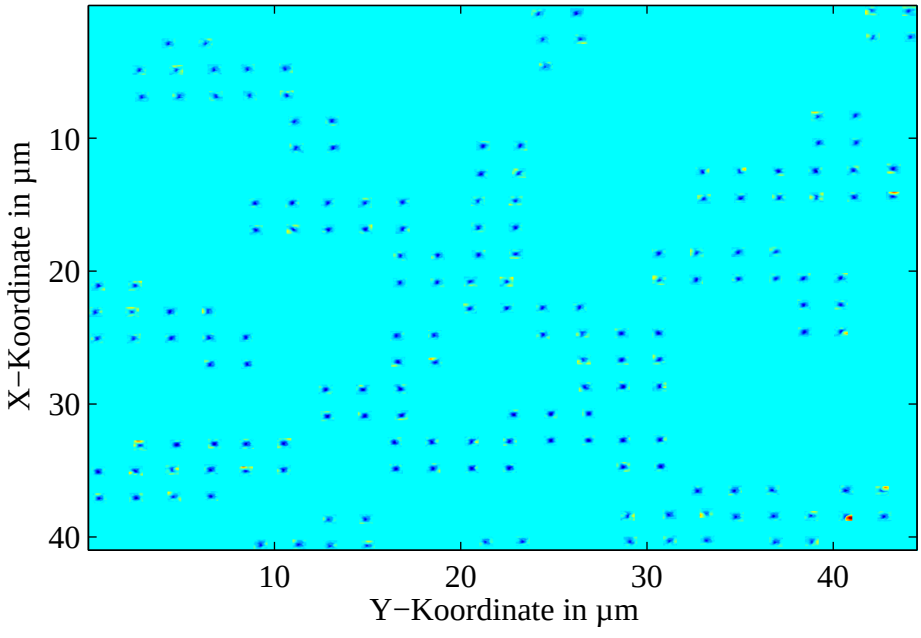


Abbildung 6.12: Oberflächenkarte der extrahierten Nanoporen.

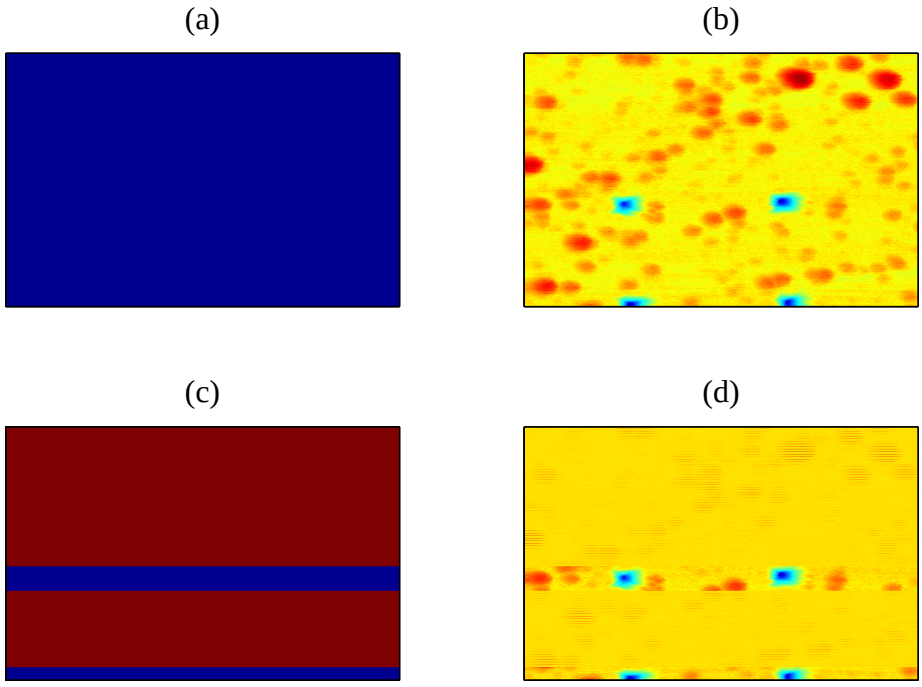


Abbildung 6.13: Messungen mit adaptiver Abtastrate (Messfeldgröße: 5 µm x 5 µm): (a,c) Wahrheitswerte für Abtastinterval (blau - 5 nm, rot - 50 nm) (b) AFM-Messdaten bei vollständiger Abstastung mit 5 nm Abtastinterval (d) Simulierte Daten für einer Abtastung mit adaptiver Abtastrate mit 5 beziehungsweise 50 nm Abtastinterval.

rameter: Abtastintervall: 50 beziehungsweise 5 nm; Messfeldgröße: 5 µm × 5 µm) eine Reduktion der Messzeit und des Messweges um den Faktor fünf erreichen werden (siehe Abbildung 6.13).

Neben der Untersuchung und Implementierung neuer Messstrategien wird auch das Verschleißverhalten von diamantbeschichteten Siliziumcantilevern untersucht. Als Maß für den Verschleiß der Messspitze dient die maximale Eindringtiefe der Messspitze in die Poren innerhalb eines Messfeldes. Es zeigt sich, dass selbst diamantbeschichtete Cantilever ein extremes Abnutzungsverhalten aufweisen (siehe Abbildung 6.14). Es ist davon auszugehen, dass der Hauptmechanismus des Verschleißes bei der Messung von Nanoporen nicht eine langsame kontinuierliche Abnutzung, sondern ein Bruch beziehungsweise ein Abscheren von Teilen der Cantileverspitze ist. Dabei zeigt der Verlauf der Abnutzung in Abbildung 6.14 in der Anfangsphase einen exponentiellen Verlauf, welcher sich später stabilisiert und in einen linearen Verlauf übergeht. Die Messfelder innerhalb der exponentiellen Anfangsphase des Verschleißes werden aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Ausgehend von der Hypothese, dass der Hauptfaktor des Verschleißes ein Abbruch beziehungsweise Abscheren von Teilen der Cantileverspitze ist sollte in Zukunft untersucht werden, ob eine Begrenzung des Eintauchen der Cantileverspitze zu einer Verringerung des Verschleißes führt. Dies kann durch eine Aktualisierung der Firmware der NMM geschehen. Die aktuelle Firmware beherrscht nur den 1D-Befehlssatz. In Folge der Weiterentwicklung der NMM haben die SIOS Messtechnik GmbH und die TU Ilmenau mittlerweile einen 3D-Befehlssatz entwickelt, welcher

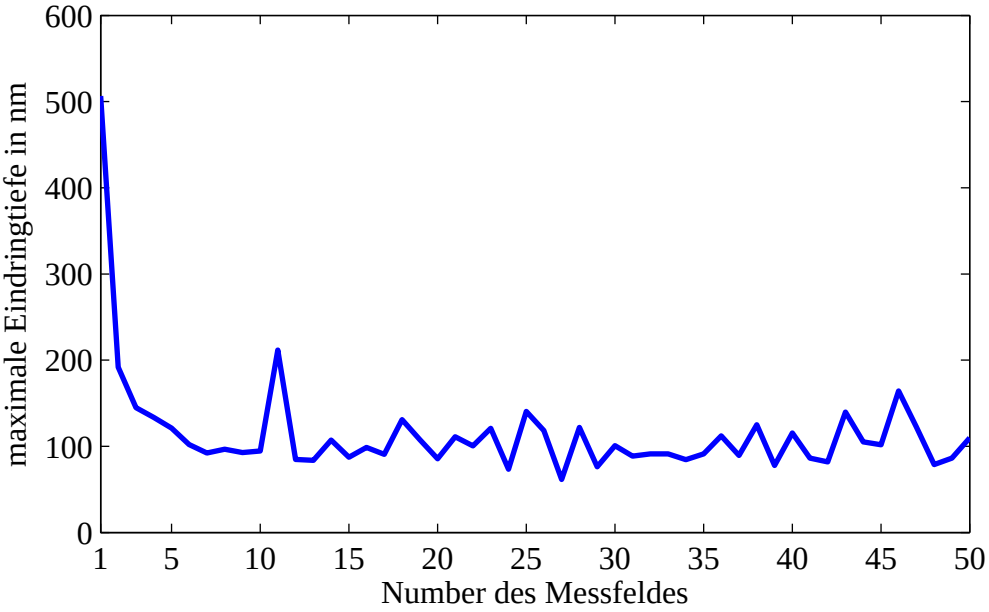


Abbildung 6.14: Graphische Darstellung des Verschleißes der Cantileverspitze auf Basis der maximalen Eindringtiefe des Cantilevers (Messfeldgröße: $5\,\mu\mathrm{m} \times 5\,\mu\mathrm{m}$ / Messgeschwindigkeit: $7\,\mu\mathrm{m/s}$ / Auflösung: $5\,\mathrm{nm}$).

Methoden zur Handhabung von tiefen Löchern beinhaltet. Allerdings würde die Umstellung eine komplette Neuimplementierung der Schnittstelle nötig machen.

Nach der erfolgreichen Implementierung und Anwendung der neuen Messstrategien werden im Folgenden Ansätze zur Extraktion der Geometrieparameter der Nanoporen vorgestellt. Die Messdaten der Nanoporen sind in bekannter Art und Weise (siehe Abschnitt 5.1) durch die Geometrie der Cantileverspitze verzerrt. Ein morphologische Rekonstruktion der Messdaten ist bei Messungen von Nanoporen wenig sinnvoll, da die Messdaten innerhalb des Porendurchmessers allein die Cantileverspitze abbilden. Somit würde eine Rekonstruktion keine neuen Informationen liefern, sondern vielmehr eine neue Fehlerquelle schaffen. Aus diesen Gründen ist die einzig mögliche Strategie die Position der obersten Kante des Kantenübergangs zu bestimmen. Dies geschieht unter der Annahme, daß der Kantenübergang scharf ist. Aufgrund der Oberflächenrauheit der Membranoberfläche und des Rauschens des AFMs erweist es sich als schwierig den exakten Höhenwert der Membranoberseite zu bestimmen. Ebenso versagen bekannte konventionelle Kantendetektoren beim Versuch einer kantenbasierten Segmentierung der Nanoporen. Aus diesem Grund werden zur Segmentierung der Nanoporen ein alternatives Segmentierungsverfahren auf Basis eines vorhandenen regionenbasierten, aktiven Konturmodells (siehe Stand der Technik - Abschnitt 2.7.1) untersucht. Diese Klasse von Segmentierungsalgorithmen beschreibt das Segmentierungproblem für ein Bild I, als die Aufgabe eine Kontur C zu finden, welche das Bild in nicht überlappende Regionen teilt. Auf dieser Basis wurde von *Mumford und Shah* [MS89] folgendes Energiefunktional vorgeschlagen:

$$\mathfrak{F}^{MS}(u,C) = \int\int_{\Omega} (u\,(x,y) - I\,(x,y))^2\,dxdy + \mu \int\int_{\Omega\setminus C} |\nabla u\,(x,y)|^2\,dxdy + \nu\,|C|$$

Die Minimierung des Funktionals führt zu einer optimalen Kontur C, welche das Bild I segmentiert, und dem Bild u, welches das Bild I approximiert und homogen in jeder verbundenen, segmentierten Region ist. Der erste Term des Funktionals stellt die Approximation von I durch u sicher. Der zweite Term sorgt für die Homogenität der einzelnen segmentierten Regionen. Der dritte Term dient der Minimierung der Länge der Kontur C. Die Minimierung des Funktionals ist durch die niedrige Dimension der Kontur C und die Nichtkonvexität des Funktionals schwierig [LKGD08]. Ein Lösungsansatz für das Mumford-Shah-Problem wurde von *Chan und Vese* [CV01] unter Annahme, dass das Bild u eine stückweise konstante Funktion ist, erstellt:

$$\mathfrak{F}^{CV}(C,c_1,c_2) = \lambda_1 \int\int_{aussen(C)} |I\,(x,y) - c_1|^2\,dxdy + \lambda_2 \int\int_{innen(C)} |I\,(x,y) - c_2|^2\,dxdy + \nu\,|C|$$

Bei diesem Ansatz werden Intensitäten der Regionen außerhalb und innerhalb der Kontur C durch zwei Konstanten c_1 und c_2 approximiert. Die Konstanten c_1 und c_2 stellen nach erfolgter Segmentierung die Mittelwerte der Intensitäten der verbundenen Regionen dar. Aus diesem Grund versagt dieser Ansatz bei Segmentierungsproblemen mit Intensitätsinhomogenitäten, zu denen auch die Segmentierung der Nanoporen zählt. Dieses Problem lösten *Chan und Vese* durch die Einführung von stückweise glatten Funktionen zur Approximation der Intensitäten der verbundenen Regionen [VC02]. Dieser Ansatz ist jedoch rechnenintensiv. Die in dieser Arbeit zur Segmentierung der Nanoporen verwendete Methode [LKGD07, LKGD08] definiert zur Lösung des Mumford-Shah-Problems einen lokalen Energieterm ϵ^{Fit} auf Basis eines gewichten, mittleren Fehlers zwischen dem Bild I und seiner Approximation. Die Gewichtung und Lokalisation erfolgt durch einen Gaußfilter. Der Algorithmus liefert bei Anwesenheit von Intensitätsinhomogenitäten bessere Segmentierungsresulate als Algorithmen, welche auf stückweise glatten Funktionen beruhen und ist gleichzeitig deutlich weniger rechnenintensiv [LKGD07, LKGD08]. Nach der Bestimmung der Porenkontur durch den Segmentierungsalgorithmus wird der Durchmesser auf Basis des Pferchkreis-Kriteriums ermittelt (siehe Abbildung 6.15). Die ermittelten Durchmesser zeigen eine Abhängigkeit von der Lage der Poren im Datensatz, diese läßt sich auf einen Einfluß des Abnutzungsgrades der Cantileverspitze auf die Segmentierung der Nanoporen zurückführen. Dies führt dazu, dass Poren, die weiter vorne im Datensatz liegen und bei einem geringen Verschleiß der Cantileverspitze gemessen wurden größere Durchmesserwerte zeigen als Poren, die weiter hinter im Datensatz liegen und mit einer verschlissenen Cantileverspitze gemessen wurden. Dieses Verhalten des Segmentierungsalgorithmus läßt sich auf den Einfluß des Gradientens der Höhenwerte auf den Segmentierungsalgorithmus zurückführen. Die Entwicklung der Kontur in Form einer Differentialgleichung wird unter anderem durch den Gradienten der Höhenwerte gesteuert, da der Gradient der Höhenwerte innerhalb der Nanoporen direkt mit der Spitzenform verbunden ist, ist die Segmentierung nicht unabhängig vom Abnutzungsgrad der Cantileverspitze. Durch die starke

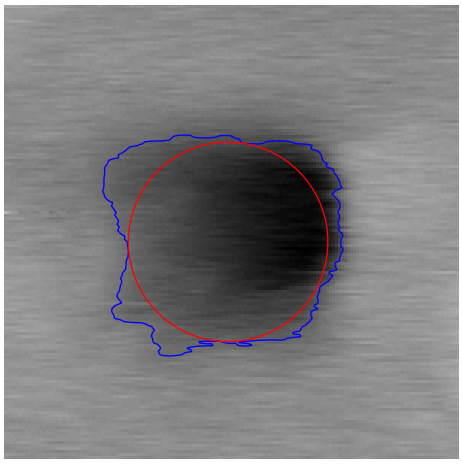


Abbildung 6.15: Segmentierte Nanoporen mit eingezeichnetem Pferchkreis.

Veränderung der Spitzengeometrie ist eine quantitative Auswertung der gewonnenen Messdaten bis zu einer Lösung des Abnutzungsproblems nicht möglich.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Für eine kommerzielle Nutzung der Nanometrologie müssen Rasterkraftmikroskope benutzerfreundlicher werden. Im Rahmen vorliegenden Arbeit wurden wichtige Methoden zur Automatisierung der NCMM vorgestellt und implementiert.

Im **dritten Kapitel** wurde die Regelung und Messdynamik des Rasterkraftmikroskops eingehend untersucht. Bestehende Messartefakte im Kontaktmodus konnten nach der Optimierung des Systems vollständig unterdrückt werden. Eine experimentelle Reglerstruktur auf Basis eines Field Programmable Analog Arrays (FPAA) wurde untersucht und erfolgreich eingesetzt. Im Rahmen der regelungstechnischen Charakterisierung wurden bestehende Schwächen im Aufbau des Systems aufgedeckt, welche nur durch einen vollständigen Umbau des Systems gelöst werden können. Wichtige Ansätze zur Weiterentwicklung des Systems konnten erarbeitet werden.

Das **vierte Kapitel** behandelt die Automatisierung der Messabläufe der NCMM. Auf Basis von Methoden den digitalen Bildverarbeitung wurde eine vollständige Kette von Algorithmen zur automatisierten Steuerung der NCMM entwickelt. Die eingesetzten Verfahren schließen Methoden zur die Generierung von Messplänen auf Basis von Vorwissen, die markerbasierte Orientierung auf großflächigen Proben und eine automatisierte Messung von Messelementen ein. Diese Methoden lassen sich leicht auf kommerzielle Rasterkraftmikroskope übertragen. Eine Übertragung auf andere Metrologiesysteme, z.B. optische Mikroskope, ist in einfacher Weise möglich.

Im **fünften Kapitel** wurden die Hauptfaktoren der Messunsicherheit der NCMM im Rahmen einer Grundkalibrierung des Systems ermittelt. Gängige Kalibrierverfahren wurden auf Basis der im vierten Kapitel erarbeiteten Methoden automatisiert. Für die automatisierte Kalibrierung und die Untersuchung der Nichtlinearität des metrologischen Sensors des Rasterkraftmikroskops wurde eine neues Kalibrierverfahren entwickelt.

Im **sechsten Kapitel** werden Messstrategien zur Messungen und Extraktion von Geometrieelementen durch Kantenkriterien entwickelt. Anhand einer Fallstudie, werden die in der Arbeit

entwickelten Methoden zur Automatisierung von AFM-Messungen zur Charakterisierung von Nanofiltrationsmembranen eingesetzt. Die Entwicklung von Messstrategien für die Charakterisierung von Nanofiltrationsmembranen ist eine Voraussetzung für deren kommerzielle Weiterentwicklung und Anwendung. Innerhalb dieser Untersuchung wurden neue Messstrategien für die Charakterisierung großflächiger Proben mit nanoskaligen Merkmalen entwickelt. Besonders die automatische Variation der Abtastrate in Abhängigkeit vordefinierter Parameter ist hervorzuheben. Es wurden neue Ansätze zur Extraktion der Geometrieparameter von Nanoporen durch Methoden der digitalen Bildverarbeitung entwickelt.

Die im Rahmen dieser Arbeit mit der NCMM gesammelten Erfahrungen liefern viele Denkanstösse für weitere Untersuchungen. Die Kalibrierung der NCMM zeigt, dass bei der Messunsicherheit der NCMM noch Möglichkeiten zur Optimierung bestehen. Vor allem sollte der AFM-Sensor modifiziert werden. Es muss ein ganzheitliche Messunsicherheitskonzept für die NCMM entwickelt werden, welches neben der NMM und dem AFM auch die Umgebungseinflüsse einbezieht.

Der Einfluss der Umgebung auf die Messunsicherheit der NCMM kann durch folgende Maßnahmen reduziert werden:

- Die Schallisolation mittels Schallschutzhaube kann durch die Verwendung von schallisolierenden Verbundwerkstoffe weiter verbessert werden.
- Die Schwingungsisolation über einen druckluftgelagerten Tisch sollte in neues Konzept der Strukturdynamik einbezogen werden.
- Eine stabile und redundant ausgelegte Klimaanlage sollte Voraussetzung für ein metrologisches Labor sein.

Der sehr geringe Beitrag der NMM-1 zur Messunsicherheit der NCMM kann durch folgende Maßnahmen verringert werden:

- Die TU Ilmenau hat ein Konzept zur Kompensation der nichtlinearen Reibkraft der Führungen der NMM entwickelt, welche die noch vorhandenen Regelungsabweichungen stark reduziert [AHAJ08]. Wahrscheinlich wird demnächst eine Reibkraftkompensation als Firmware-Update zur Verfügung stehen.
- Die Verkoppelung der Regelung der NMM und des AFM muss weiter untersucht werden. Allerdings sind solche Untersuchungen ohne direkte Eingriffsmöglichkeiten in die internen Abläufe der NMM äußerst schwierig durchzuführen. Die Regelung muss als ein Gesamtkonzept untersucht und weiter verbessert werden.
- Die Strukturdynamik der Halterungen der Sensoren sollte untersucht werden. Es ist darauf zu achten, dass die mechanischen Resonanzfrequenzen der Sensorhalterung nicht im Frequenzbereich der AFM-Messungen liegen.

- Der metrologische Rahmen ist so kurz wie möglich zu gestalten.

Der AFM-Sensor hat den größten Beitrag zur Messunsicherheit der NCMM. Deshalb sollte auch das Hauptaugenmerk in den zukünftigen Forschungsaktivitäten und Investitionen auf seiner Verbesserung liegen. Es gibt drei verschiedene Konzepte für dessen Weiterentwicklung:

1. Verbesserung des jetzigen AFMs
2. Dual-Stage-System mit Sample Scanner
3. CD-AFM

Die **Verbesserung des jetzigen AFMs** zielt vor allem auf eine Minimierung der internen Störgrößen ab. Der Stapelpiezo des AFMs (Physikinstrumente 841.10) hat zur Zeit eine Kapazität von ca. $1{,}5\,\mu\mathrm{F}$. Mittlerweile hat der Hersteller des Piezoaktor eine Serie mit kleineren Abmaßen, geringerer Kapazität und somit verbesserter Dynamik auf den Markt gebracht. Des Weiteren gibt es spezielle, rauscharme Hochspannungsverstärker für AFMs, beispielsweise von der Firma Tech-Project. Das Gehäuse des AFM-Messkopfes und die Halterung sollten in Invar ausgeführt werden, um den Einfluss von Temperaturänderungen auf die Messung zu minimieren. Ein Hauptfaktor der interne Störgrößen ist das Interferometerkabel des AFMs. Es sollte demnach der Versuch unternommen werden, das Interferometer in den AFM-Messkopf zu integrieren, um Störungen durch eine lange Interferometerstrecke zu minimieren. Weitere Möglichkeiten zur Verbesserung des AFMs ergeben sich aus einem Umbau des Cantileversteckers. Die Halterung des Cantileversteckers sollte mechanisch stabil ausgeführt werden. Außerdem sollte der Cantileverwechsel schnell und ohne viel Fingerspitzengefühl durchführbar sein. Der Einsatz von Polymeren innerhalb von Klebverbindungen zur Befestigung des Alignmentchips des Cantilevers, sollte aufgrund des relativ hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten minimiert werden. Außerdem sollte an einer Verschlankung des AFM-Messkopfes gearbeitet werden. Bei einem verschlankten AFM-Messkopf gäbe es nicht die Notwendigkeit eines Sensorwechselsystems, was zu einer aus messtechnischer Sicht positiven Verkürzung des metrologischen Rahmens führen würde.

Im dritten Kapitel zeigten sich die physikalischen Beschränkungen des jetzigen Designs als ein sogenannter „Probe Scanner“. Zur Umgehung dieser physikalischen Beschränkungen ist eine komplette Veränderung des Designs notwendig. Der Umbau von einem „Probe Scanner“ (bewegter Cantilever) in einen „Sample Scanner“ (bewegte Probe). Die PTB verfügt bereits über ein metrologisches Rasterkraftmikroskop auf Basis der NMM [DPD^{+}04b], welches als „Sample Scanner“ beziehungsweise **Dual-Stage-System** arbeitet. Als Aktor bietet sich beispielsweise ein Phasenschieber der Firma „Physikinstrumente“ an. Dieser wird zur hochgenauen und schnellen Positionierung von Spiegeln, beispielsweise in Laseroptiken, verwendet. Er besitzt einen Mess- und Bewegungsbereich von $2\,\mu\mathrm{m}$ und durch seinen kapazitiven Sensor einen Wegauflösung im Subnanometerbereich. Damit würde sich die Auflösung um eine Größenordnung erhöhen.

Die Messunsicherheit wird potentiell verringert. Gleichzeitig sollte die Aktorik aus dem AFM-Messkopfs entfernt werden. Im AFM-Messkopf verbleiben allein der interferometrische Sensor und der Anregungpiezo für den Cantilever. Der so verkleinerten AFM-Messkopf findet ohne die Notwendigkeit eines Wechselsystems im Messraum der NMM Platz, was die Messunsicherheit verringern würde. Bei der Regelung des Systems ist die Möglichkeit der Implementierung einer H∞-Regelung zu untersuchen. Neben der Weiterentwicklung der NCMM wird der Aufbau eines von der NCMM unabhängigen High-Speed-AFMs basierend auf dem Konzept eines „Sample Scanner“ vorgeschlagen.

Mit dem jetzigen AFM sind keine wirklichen „critical dimension“ (CD) - Messungen möglich, da eine Messung der Seitenwände von Gräben und steilen Flanken nicht möglich ist. Die Entwicklung eines echten **CD-AFM**-Messkopfes mit einer Anregung in zwei Dimensionen ist sehr anspruchsvoll, sollte aber das Ziel der weiteren Forschungsbemühungen sein.

Von den drei Varianten wird zur Zeit der Aufbau eines Dual-Stage-Systems favourisiert und möglicherweise im Rahmen eines zukünftigen DFG-Projekts umgesetzt. Gegenstand des DFG-Projekts sollen dimensionelle Rauheitsmessungen und die Untersuchung von nichtlinearen Verzerrungen durch die Spitzengeometrie sein.

Neben der Weiterentwicklung des AFM-Sensors sollte auch die optische Sensorik der NCMM weiterentwickelt werden. Die NCMM könnte zu einer vollwertigen optischen Koordinatenmessmaschine weiterentwickelt werden. Hierfür sollte ein hochdynamischer Antrieb für den Z-Fokus mit einen metrologischen Sensor hoher Auflösung entwickelt werden, um die Funktionen des optischen Mikroskops wie beispielsweise den Autofokus zu beschleunigen. Für optische Präzisionsmessungen ist ein elektronisch regelbarer Lichtgenerator notwendig. Neben der Verbesserung des optischen Hellfeldmikroskops wäre ebenfalls der Einbau eines konfokalen Mikroskops oder eines Weißlichtinterferometer interessant. Für die Kalibrierung der Optiken sind Normale zu beschaffen.

Für eine normgerechte Kalibrierung werden Normale mit verschiedenen Gitterperioden benötigt, insbesondere bei sehr kleinen Gitterperioden stehen keine Normale zur Verfügung. Grundsätzlich sollte für die Kalibrierung der lateralen Achsen Normale mit einer geringen Strukturhöhe verwendet werden. Hier können zum Beispiel die 2D-Normale der Firma Nanosensors verwendet werden, welche aus einem Gitter von pyramidalen Vertiefungen von einer Tiefe von ca. $70\,\mathrm{nm}$ aufgebaut sind. Bestehende Normale sollten in regelmäßigen Abständen rezertifiziert werden, um Veränderungen der kalibrierten Topologien zu dokumentieren. Aufgrund der geringen Temperaturstabilität der Reinraumklimatisierung wurde im Kapitel 5 auf weiterführende Kalibrierungen verzichtet, insbesondere die Langzeitstabilität einer Kalibrierung wäre eine interessante Untersuchungsgröße, welche allerdings stabilere Umweltbedingungen erfordert.

Ein weiteres sich aus dieser Arbeit ergebendes Forschungsthema ist die Untersuchung von Verzerrung der Messdaten aufgrund des endlichen Radius der Messspitze des AFMs. Einerseits sollte die Untersuchung der nichtlinearen Verzerrungen weiter vorangetrieben werden. Andererseits sollte die bereits bekannten Methoden zur morphologischen Rekonstruktion der Messdaten verbessert werden, insbesondere in Zusammenhang mit CD-Messungen ergeben sich neue, interessante Ansätze, z.B. durch die Verwendung von Drexels [TQV08]. Die rechnentechnische Optimierung der morphologischen Entzerrung sollte durch die Parellelisierung der bereits bekannten Algorithmen [Vil97] vorangetrieben werden. Bei der Rekonstruktion der Messdaten sollte ebenfalls eine Untersuchung der Abnutzung von Cantileverspitzen und ihres Einflusses auf die Messunsicherheit durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

[AA07] ANDERSSON, S.B. ; ABRAMOVITCH, D.Y.: A Survey of Non-Raster Scan Methods with Application to Atomic Force Microscopy. In: *American Control Conference, 2007. ACC '07*, 2007, S. 3516–3521

[AAB+84] ADELSON, E.H. ; ANDERSON, C.H. ; BERGEN, J.R. ; BURT, P.J. ; OGDEN, J.M.: Pyramid methods in image processing. In: *RCA Engineer* 29 (1984), S. 33–41

[AAPS07] ABRAMOVITCH, D.Y. ; ANDERSSON, S.B. ; PAO, L.Y. ; SCHITTER, G.: A Tutorial on the Mechanisms, Dynamics, and Control of Atomic Force Microscopes. In: *American Control Conference, 2007. ACC '07*, 2007, S. 3488–3502

[ABKC90] ALPERT, N. M. ; BRADSHAW, J. F. ; KENNEDY, D. ; CORREIA, J. A.: The Principal Axes Transformation–A Method for Image Registration. In: *J Nucl Med* 31 (1990), Nr. 10, S. 1717–1722

[AHAJ08] AMTHOR, A. ; HAUSOTTE, T. ; AMENT, Ch. ; JÄGER, G.: Friction Identification and Compensation on Nanometer Scale. In: *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, 2008, S. 2014–2019

[AJ05] ANDERSSON, S.B. ; JIWOONG, P.: Tip steering for fast imaging in AFM. In: *American Control Conference, 2005. Proceedings of the 2005*, 2005. – ISSN 0743–1619, S. 2469–2474 vol. 4

[AKB08] AGRAWAL, M. ; KONOLIGE, K. ; BLAS, M.: CenSurE: Center Surround Extremas for Realtime Feature Detection and Matching. In: FORSYTH, David (Hrsg.) ; TORR, Philip (Hrsg.) ; ZISSERMAN, Andrew (Hrsg.): *Computer Vision – ECCV 2008* Bd. 5305. Springer Berlin / Heidelberg, 2008, S. 102–115

[Ana06] ANADIGM (Hrsg.): *AnadigmApex dpASP Family User Manual*. 2036 N.Gilbert Road, Suite 2-417, Mesa, AZ, 85203: Anadigm, 2006

[And07] ANDERSSON, S.B.: Curve Tracking for Rapid Imaging in AFM. In: *NanoBioscience, IEEE Transactions on* 6 (2007), Dec., Nr. 4, S. 354–361

[And08] ANDERSSON, S.B.: Discretization of a Continuous Curve. In: *IEEE Transactions on Robotics* 24 (2008), Nr. 2, S. 456–461

[BA83] BURT, P.J. ; ADELSON, E.H.: The Laplacian pyramid as a compact image code. In: *IEEE Transactions on Communications* 31 (1983), Nr. 4, S. 532–540

[Bar05] BARIANI, P.: *Dimensional metrology for microtechnology*, Technical University von Dänemark, Diss., 2005

[BBB+06] BÜTTGENBACH, S. ; BRAND, U. ; BÜTEFISCH, S. ; HERBST, Ch. ; KRAH, T. ; PHATARALAOHA, A. ; TUTSCH, R.: Taktile Sensoren für die Mikromesstechnik. In: *Messtechnik für Mikro- und Nano-Engineering*, VDI Wissensforum IWB GmbH, 2006, S. 109–118

[BCH+01] BRAND, U. ; CAO, S. ; HOFFMANN, W. ; KLEINE-BESTEN, T. ; PORNNOPPADOL, P. ; BÜTTGENBACH, S.: A Micro-Probing System for Dimensional Metrology on Microsystem Components. In: *Precision enginering, nanotechnology: proceedings of the EUSPEN 2nd International Conference*, 2001, S. 266–269

[BCK05] BUTT, H-J ; CAPPELLA, B ; KAPPL, M: Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications. In: *Surface Science Reports* 59 (2005), S. 1–152

[BGH+98] BIENIA, M. ; GAO, S. ; HASCHE, K. ; SEEMANN, R. ; THIELE, K.: A metrological scanning force microscope used for coating thickness and other topographical measurements. In: *Applied Physics A* 66 (1998), S. S837–S842

[BHR98] BRINKSMEIER, E. ; HÖPER, R. ; RIEMER, O.: Rasterkraftmikroskopie anwenden. In: *Materialprüfung* 40 (1998), Nr. 9, S. 358–360

[BL03] BROWN, M. ; LOWE, D. G.: Recognising Panoramas. In: *Computer Vision, IEEE International Conference on* 2 (2003), S. 1218

[BM92] BESL, P. J. ; MCKAY, N.: A method for registration of 3-D shapes. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14 (1992), S. 239–256

[BN97] BARTHLOTT, W. ; NEINHUIS, C.: Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. In: *Planta* 202 (1997), Nr. 1, S. 1–8

[Bor88] BORGEFORS, G.: Hierarchical Chamfer Matching: A Parametric Edge Matching Algorithm. In: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 10 (1988), S. 849–865

[BQG86] BINNIG, G. ; QUATE, C. F. ; GERBER, C.: Atomic force microscope. In: *Physical Review Letters* 56 (1986), S. 930–933

[BR07] BRADLEY, D. ; ROTH, G.: Adaptive Thresholding using the Integral Image. In: *Journal of Graphics, GPU, and Game Tools* 12 (2007), Nr. 2, S. 13–21

[BRGW83] BINNIG, G. ; ROHRER, H. ; GERBER, Ch. ; WEIBEL, E.: 7 x 7 Reconstruction on Si (111) Resolved in Real Space. In: *Phys. Rev. Lett.* 50 (1983), S. 120

[BSP07] BAUER, J. ; SÜNDERHAUF, N. ; PROTZEL, P.: Comparing several Implementations of two recently published Feature Detectors. In: *Proc. of the International Conference on Intelligent and Autonomous Systems*, 2007

[BTBW77] BARROW, H.G. ; TENENBAUM, J.M. ; BOLLES, R.C. ; WOLF, H.C.: Parametric correspondence and chamfer matching: Two new techniques for image matching. In: *Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Artifical Intelligence*, 1977, S. 659–663

[BTVG08] BAY, H. ; TUYTELAARS, T. ; VAN GOOL, L.: SURF: Speeded Up Robust Features. In: *Computer Vision and Image Understanding* 110 (2008), S. 346–359

[CA08] CHANG, P.I. ; ANDERSSON, S.B.: Smooth trajectories for imaging string-like samples in AFM: A preliminary study. In: *American Control Conference, 2008*, 2008, S. 3207–3212

[CA09a] CHANG, P.I. ; ANDERSSON, S.B.: A maximum-likelihood detection scheme for rapid imaging of string-like samples in atomic force microscopy. In: *IEEE Conference on Decision and Control*, 2009, S. 8290–8295

[CA09b] CHANG, P.I. ; ANDERSSON, S.B.: Theoretical bounds on a non-raster scan method for tracking string-like samples. In: *Proceedings of the American Control Conference 2009*, 2009, S. 1682–1687

[Can86] CANNY, J.: A Computional Approach to Edge Detection. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-8 (1986), S. 679–697

[Car] CARL ZEISS (Hrsg.): *Inspektions-Mikroskop Axiotron*. Carl Zeiss Str. 22, 73447 Oberkochen: Carl Zeiss

[Cas77] CASASENT, Demetri David; P. David; Psaltis: New Optical Transforms for Pattern Recognition. In: *Proceedings of the IEEE* 65 (1977), S. 77–84

[CD99] CROFT, D. ; DEVASIA, S.: Vibration compensation for high speed scanning tunneling microscopy. In: *Review of Scientific Instruments* 70 (1999), Nr. 12, S. 4600–4605

[CDD94] CHEN, Q.-S. ; DEFRISE, M. ; DECONINCK, F.: Symmetric Phase-Only Matched Filtering of Fourier-Mellin Transforms for Image Registration and Recognition. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 16 (1994), S. 1156–1168

[CFK+07] CHEN, Q. ; FAN, Y. ; KUMAR, S. ; BACZEWSKI, A. D. ; UDPA, L. ; AYRES, V. M. ; AHMED, I. ; MEINERS, S. ; RICE, A. F.: Cell Response and Tissue Scaffold Triggers Investigated by Scanning Probe Recognition Microscopy. In: *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 2007, S. 1019–FF06–04

[CMPW00] CORBETT, J. ; MCKEOWN, P.A. ; PEGGS, G.N. ; WHATMORE, R.: Nanotechnology: International Developments and Emerging Products. In: *Annals of CIRP* 49 (2000), Nr. 2, S. 523–545

[Cro84] CROW, F. C.: Summed-area tables for texture mapping. In: *SIGGRAPH '84: Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA : ACM, 1984, S. 207–212

[CSD01] CROFT, D. ; SHED, G. ; DEVASIA, S.: Creep, hysteresis, and vibration compensation for piezoactuators: Atomic force microscopy application. In: *ASMF J. Dyn., Sys., Meas., Ctrl.* 128 (2001), Nr. 35, S. 35–43

[CV01] CHAN, T. F. ; VESE, L. A.: Active Contours Without Edges. In: *IEEE Transactions on Image Processing* 10 (2001), Nr. 2, S. 266–277

[DBPD09] DAI, G. ; BUTEFISCH, S. ; POHLENZ, F. ; DANZEBRINK, H.-U.: A high precision micro/nano CMM using piezoresistive tactile probes. In: *Measurement Science and Technology* 20 (2009), Nr. 8, S. 084001 (9pp)

[DCKPL03] DE CHIFFRE, L. ; KUNZMANN, H. ; PEGGS, G. N. ; LUCCA, D. A.: Surfaces in Precision Engineering, Microengineering and Nanotechnology. In: *Annals of CIRP* 52 (2003), Nr. 2, S. 561–577

[DDX+09] DANZEBRINK, H.-U. ; DZIOMBA, T. ; XU, M. ; PIDDUCK, A. ; LEACH, R. ; YACOOT, A. ; KOENDERS, L.: Scanning Probe Microscopy, Scanning Electron Microscopy And Critical Dimension: Nanometrology Status and Future Needs within Europe. In: *Nanometrology Discussion Papers* Co-Nanomet, 2009, S. 55–77

[DGKF89] DOYLE, J. C. ; GLOVER, K. ; KHARGONEKAR, P. P. ; FRANCIS, B. A.: State-space Solutions to Standard H_2 and H_∞ Control Problems. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 34 (1989), S. 831–847

[DHH+06] DOROZHOVETS, N. ; HAUSOTTE, T. ; HOFMANN, N. ; MANSKE, E. ; JÄGER, G.: Development of the interferometrical scanning probe microscope. In: *Interferometry XIII: Applications, Proceedings of SPIE Vol. 6293*, 2006, S. 629311

[DJP+04] DAI, G. ; JUNG, L. ; POHLENZ, F. ; H.-U., Danzebrink ; KRÜGER-SEHM, R. ; HASCHE, K. ; WILKENING, G.: Measurement of micro-roughness using a metrological large range scanning force microscope. In: *Measurement Science and Technology* 15 (2004), S. 2039–2046

[DKP+05] DAI, G. ; KOENDERS, L. ; POHLENZ, F. ; DZIOMBA, T. ; DANZEBRINK, H.-U.: Accurate and traceable calibration of one-dimensional gratings. In: *Measurement Science and Technology* 16 (2005), S. 1241–1249

[DKW+06] DANZEBRINK, H.-U. ; KOENDERS, L. ; WILKENING, G. ; YACOOT, A. ; KUNZMANN, H.: Advances in Scanning Force Microscopy for Dimensional Metrology. In: *Annals of CIRP* 55 (2006), Nr. 2, S. 841–878

[DMT75] DERJAGUIN, B. V. ; MÜLLER, V. M. ; TOPOROV, Y. P.: Effect of contact deformations on the adhesion of particles. In: *J. Coll. Interf. Sci.* 53 (1975), S. 314–326

[DOO+05] DAHLEN, G. ; OSBORN, M. ; OKULAN, N. ; FOREMAN, W. ; CHAND, A. ; FOUCHER, J.: Tip characterization and surface reconstruction of complex structures with critical dimension atomic force microscopy. In: *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* 23 (2005), Nr. 6, S. 2297–2303

[DPD+04a] DAI, G. ; POHLENZ, F. ; DANZEBRINK, H.-U. ; HASCHE, K. ; WILKENING, G.: Improving the performance of interferometers in metrological scanning probe microscopes. In: *Measurement Science and Technology* 15 (2004), S. 444–450

[DPD+04b] DAI, G. ; POHLENZ, F. ; DANZEBRINK, H.-U. ; XU, M. ; HASCHE, K. ; WILKENING, G.: Metrological large range scanning probe microscope. In: *Review of Scientific Instruments* 75 (2004), S. 962–969

[DPD+05] DAI, G. ; POHLENZ, F. ; DANZEBRINK, H.-U. ; XU, M. ; HASCHE, K. ; WILKENING, G.: Metrological Large Range Scanning Force Microscope Applicable for Traceable Calibration of Surface Textures. In: *Nanoscale Calibration Standards and Methods: Dimensional and Related Measurements in the Micro- and Nanometer Range*. Wiley-VCH, 2005, S. 73–92

[EB99] EVANS, C.J. ; BYRAN, J.B.: “Structured“, “textured“ or “engineered“ surfaces. In: *Annals of CIRP* 48 (1999), Nr. 2, S. 541–556

[EMC09] EBRAHIMI, M. ; MAYOL-CUEVAS, W. W.: SUSurE: Speeded Up Surround Extrema Feature Detector and Descriptor for Realtime Applications. In: *“Workshop on Feature Detectors and Descriptors: The State Of The Art and Beyond“ as part of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2009*, 2009

[Eva09] EVANS, C.: Notes on the OpenSURF Library / University of Bristol. Version: January 2009. http://www.cs.bris.ac.uk/Publications/Papers/2000970.pdf. 2009 (CSTR-09-001). – Forschungsbericht

[Eve09] EVES, B. J.: Design of a large measurement-volume metrological atomic force microscope (AFM). In: *Meas. Sci. Technol.* 20 (2009), S. 084003

[FA94] FELDMAR, J. ; AYACHE, N.: Rigid and affine registration of smooth surfaces using differential properties. In: *Proceedings of Third European Conference on Computer Vision*, 1994, S. 397–406

[FB81] FISCHLER, M. A. ; BOLLES, R. C.: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography. In: *Comm. of the ACM Computing Surveys (CSUR)* 24 (1981), S. 381–395

[FCA+07] FAN, Y. ; CHEN, Q. ; AYRES, V. M. ; BACZEWSKI, A. D. ; UDPA, L. ; KUMAR, S.: Scanning probe microscopy investigation of tissue scaffold properties. In: *International Journal of Nanomedicine* 2 (2007), S. 651–661

[FCK+06] FAN, Y. ; CHEN, Q. ; KUMAR, S. A. ; BACZEWSKI, A. D. ; TRAM, N. V. ; AYRES, V. M. ; UDPA, L.: Registration of Tapping and Contact Mode Atomic Force Microscopy Images. In: *Nanotechnology, 2006. IEEE-NANO 2006. Sixth IEEE Conference on*, 2006, S. 193 –196

[FCK+07] FAN, Y. ; CHEN, Q. ; KUMAR, S. ; BACZEWSKI, A. D. ; UDPA, L. ; AYRES, V. M. ; RICE, A. F.: Scanning Probe Recognition Microscopy Investigation of Nanoscale Mechanical and Surface Roughness Properties Along Nanofibers. In: *Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1021*, 2007, S. 651–661

[Fit03] FITZGIBBON, A. W.: Robust registration of 2D and 3D point sets. In: *Image and Vision Computing* 21 (2003), Nr. 13-14, S. 1145 – 1153. – British Machine Vision Computing 2001

[Fri05a] FRIES, T.: Messen von Nanometer bis zum Meter. In: *inno* 29 (2005), Nr. 3, S. 14–15

[Fri05b] FRIES, T.: Mit Mikrostrukturen auf Tuchfüllung. In: *Mikroproduktion* (2005), Nr. 1, S. 40–42

[Fri06] FRIES, T.: Multi Sensor Oberflächenmesstechnik für die Nano- und Mikrotechnik. In: *VDI-Berichte 1950 Messtechnik für Mikro- und Nano-Engineering*. VDI Wissensforum IWB GmbH, 2006, S. 163–172

[FTO03] FUJIWARA, M. ; TAKAMASU, K. ; OZONO, S.: Evaluation of Properties of Nano-CMM by Thermal Drift and Tilt Angle. In: *Proc. XVII IMEKO World Congress*, 2003, S. 1794–1797

[GB92] GOTTESFELD BROWN, L.: A Survey of Image Registration Techniques. In: *ACM Computing Surveys (CSUR)* 24 (1992), S. 325 – 376

[GD88] GLOVER, K. ; DOYLE, J.C.: State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an H_∞-norm bound and relations to relations to risk sensitivity. In: *Systems & Control Letters* 11 (1988), Nr. 3, S. 167 – 172

[Gru09] GRUHLKE, M.: *Untersuchungen für den industriellen Einsatz der Nanometerkoordinatenmesstechnik,* Helmut-Schmidt-Universität, Diss., 2009

[GSTF08] GUIZAR-SICAIROS, M. ; THURMAN, S. T. ; FIENUP, J.R.: Efficient subpixel image registration algorithms. In: *Opt. Lett.* 33 (2008), Nr. 2, S. 156–158

[GWE04] GONZALEZ, R. C. ; WOODS, R. E. ; EDDINS, S. L.: *Digital image processing unsing Matlab*. Pearson Prentice Hall, 2004

[HBA+01] HE, M. ; BLUM, A.S. ; ASTON, D.E. ; BUENVIAJE, C. ; OVERNEY, R.M. ; LUGINBÜHL, R.: Critical phenomena of water bridges in nanoasperity contacts. In: *J. Chem. Phys.* 114 (2001), S. 1355–1360

[HCHDC06] HANSEN, H. N. ; CARNEIRO, K. ; HAITJEMA, H. ; DE CHIFFERE, L.: Dimensional Micro and Nano Metrology. In: *Annals of CIRP* 55 (2006), Nr. 2, S. 721–743

[Her82] HERTZ, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper. In: *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 92 (1882), S. 156–171

[HHJ04] HOFMANN, N. ; HAUSOTTE, T. ; JÄGER, E. G.and M. G.and Manske: Measurements with an Atomic Force Microscope using a long range travel Nanopositioning and Nanomeasuring Machine. In: *4th IEEE Conference on Nanotechnology*, 2004

[HHT00] HOLMES, M. ; HOCKEN, R. ; TRUMPER, D.: The long-range scanning stage: a novel platform for scanned-probe microscopy. In: *Precision Engineering* 24 (2000), S. 191–209

[HJ05] HAYCOCKS, J. ; JACKSON, K.: Traceable calibration of transfer standards for scanning probe microscopy. In: *Precision Engineering* 29 (2005), S. 168–175

[HS88] HARRIS, C. ; STEPHENS, M.: A combined corner and edge detector. In: *Proceedings of The Fourth Alvey Vision Conference, Manchester,* 1988, S. 147–151

[Hüs05] HÜSER, D.: *Untersuchungen zur Koordinatenmesstechnik für Mikrosysteme in zweieinhalb Dimensionen*. Shaker-Verlag, 2005

[HTW01] HOCKEN, R. J. ; TRUMPER, D. L. ; WANG, C.: Dynamics and Control of the UNCC/MIT Sub-Atomic Measuring Machine. In: *Annals of CIRP* 50 (2001), Nr. 1, S. 373–376

[HWMAD03] HILAL, N. ; WAHAB MOHAMMAD, A. ; ATKIN, B. ; DARWISH, N. A.: Using atomic force microscopy towards improvement in nanofiltration membranes properties for desalination pre-treatment: a review. In: *Desalination* 157 (2003), S. 137–144

[HY04] HE, X. C. ; YUNG, N. H. C.: Curvature Scale Space Corner Detector with Adaptive Threshold and Dynamic Region of Support. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'04)* Bd. 2, 2004, S. 791–794

[Inm01] INMAN, D. J.: *Engineering Vibration*. Prentice Hall, 2001

[Int] INTEGRATED DYNAMICS ENGINEERING GMBH (Hrsg.): *Bedienungsanleitung und Installationsbeschreibung für Schwingungsisolationstische der Baureihen TLC, TGU und TG*. Karl-Liebknecht-Str. 30 65479 Raunheim: Integrated Dynamics Engineering GmbH

[Isr92] ISRAELACHVILI, J N.: *Intermolecular and Surface Forces*. Academic Press, 1992

[JG09] JUAN, L. ; GWON, O.: A Comparison of SIFT, PCA-SIFT and SURF. In: *International Journal of Image Processing* 3 (2009), Nr. 4, S. 143–152

[JKR71] JOHNSON, K. L. ; KENDALL, K. ; ROBERTS, A. D.: Surface energy and the contact of elastic solids. In: *Proc. R. Soc. Lond. A* 324 (1971), S. 301–313

[JMHS02] JÄGER, G. ; MANSKE, E. ; HAUSOTTE, T. ; SCHOTT, W.: Operation and analysis of a nanopositioning and nanomeasuring machine. In: *Proceedings of the 17th Annual Meeting, The American Society for Precision Engineering*, 2002

[JTB+06] JÄGER, G. ; T., Hausotte ; BÜCHNER, H.-J. ; MANSKE, E. ; SCHMIDT, I. ; MASTYLO, R.: Long-range Nanopositioning and Nanomeasuring Machine for Application to Mico- and nanotechnology. In: *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XX, Proceedings of SPIE Vol. 6152*, 2006, S. 758–766

[KD03] KOOPS, K. R. ; DIRSCHERL, K.: Alternativ Measuring Modes for Scanning Probe Instrumentation. In: *Proceedings of the EUSPEN International Topical Conference, Aachen, Germany, May 19th/20th, 2003*, 2003

[Kel91] KELLER, D.: Reconstruction of STM and AFM images distorted by finite-size tips. In: *Surface Science* 253 (1991), Nr. 1-3, S. 353 – 364

[KMT07] KÜNG, A. ; MELI, F. ; THALMANN, R.: Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe. In: *Measurement Science and Technology* 18 (2007), S. 319–327

[Kra05] KRAMAR, J. A.: Nanometre resolution metrology with the Molecular Measuring Machine. In: *Meas. Sci. Technol.* 16 (2005), S. 2121–2128

[KWT87] KASS, M. ; WITKIN, A. ; TERZOPOULOS, D.: Snakes: Active Contour Models. In: *International Journal of Computer Vision* 1 (1987), S. 321–331

[LDD+00] LUTWYCHE, M. I. ; DESPONT, M. ; DRECHSLER, U. ; DÜRIG, U. ; HÄBERLE, W. ; ROTHUIZEN, H. ; STUTZ, R. ; WIDMER, R. ; BINNIG, G. ; VETTIGER, P.: Highly parallel data storage system based on scanning probe arrays. In: *Appl. Phys. Lett.* 77 (2000), S. 3299

[Lev44] LEVENBERG, K.: A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. In: *The Quarterly of Applied Mathematics* 2 (1944), S. 164–168

[Lew95] LEWIS, J. P.: *Fast Normalized Cross-Correlation*. 1995

[LHJ+01] LEACH, R. ; HAYCOCKS, J. ; JACKSON, K. ; LEWIS, A. ; OLDFIELD, S. ; YACOOT, A.: Advances in traceable nanometrology at the National Physical Laboratory. In: *Nanotechnology* 12 (2001), S. R1–R6

[Lin98] LINDEBERG, T.: Feature Detection with Automatic Scale Selection. In: *International Journal of Computer Vision* 30 (1998), Nr. 2, S. 77–116

[LJ31] LENNARD-JONES, J. E.: Cohesion. In: *Proc. Phys. Soc.* 43 (1931), S. 461–482

[Lju99] LJUNG, L.: *System Identification - Theory for the Users*. Prentice Hall, 1999

[LKGD07] LI, C. ; KAO, C.-Y. ; GORE, J. C. ; DING, Z.: Implicit Active Contours Driven by Local Binary Fitting Energy. In: *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on* 0 (2007), S. 1–7

[LKGD08] LI, C. ; KAO, C.-Y. ; GORE, J.C. ; DING, Z.: Minimization of Region-Scalable Fitting Energy for Image Segmentation. In: *Image Processing, IEEE Transactions on* 17 (2008), oct., Nr. 10, S. 1940 –1949

[Llo82] LLOYD, S.: Least squares quantization in PCM. In: *IEEE Transactions on Information Theory* 28 (1982), S. 129 – 137

[Low99] LOWE, D. G.: Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. In: *Proc. of the International Conference on Computer Vision ICCV, Corfu*, 1999, 1150-1157

[Low04] LOWE, D.: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. In: *International Journal of Computer Vision* 60 (2004), S. 91–110

[Mar63] MARQUARDT, D. W.: An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. In: *SIAM Journal on Applied Mathematics* 11 (1963), Nr. 2, S. 431–441

[Mau92] MAUGIS, D.: Adhesion of spheres. In: *Journal of colloid and interface science* 150 (1992), S. 243–269

[MBDCH07] MARINELLO, F. ; BARIANI, P. ; DE CHIFFRE, L. ; HANSEN, H. N.: Development and analysis of a software tool for stitching three-dimensional surface topography data sets. In: *Measurement Science and Technology* 18 (2007), S. 1404–1412

[MBT+03] MELI, F. ; BIERI, M. ; THALMANN, R. ; FRACHEBOUD, M. ; BREQUET, J.-M. ; CLAVEL, R. ; BOTTINELLI, S.: Novel 3D analogue probe with a small sphere and low measurement force. In: *Proceedings of Coordinate measuring machine*, 2003, S. 69–73

[MDT83] MÜLLER, V. M. ; DERJAGUIN, B. V. ; TOPOROV, Y. P.: On two methods of calculation of the force of sticking of an elastic sphere to a rigid plane. In: *Colloids and Surfaces* 7 (1983), S. 251–259

[MFB+03] MELI, F. ; FRACHEBOUD, M. ; BOTTINELLI, S. ; BIERI, M. ; THALMANN, R. ; BREGUET, J.-M. ; CLAVEL, R.: High Precision, Low Force 3D Touch Probe for Measurements on Small Objects. In: *Proceddings of the International Topical Conference on Precision Engineering, Micro Technology, Vol. 2*, 2003, S. 411–414

[MG01] MARCHMAN, H. M. ; GRIFFITH, J. E.: Scanned Probe Microscope Dimensional Metrology. In: DIEBOLD, Alain C. (Hrsg.): *Handbook of silicon semiconductor metrology*. CRC Press, 2001, Kapitel 15, S. 335–375

[MHR+05] MANSKE, E. ; HAUSOTTE, T. ; R., Mastylo ; T., Machleidt ; HOFMANN, N. ; JÄGER, G.: Nanopositioning and nanomeasuring machine for high accuracy measuring procedures of small features in large areas. In: *Optical Fabrication, Testing, and Metrology II, Proceedings of SPIE Vol. 5965*, 2005, S. 596509

[Mik03] MIKOLAJCZYK, C. K.and S. K.and Schmid: Indexing based on scale invariant interest points. In: *CVPR* Bd. 2, 2003, S. 257–263

[MKF04] MEYER, M. ; KOGLIN, J. ; FRIES, T.: Bridging of Gap between Nanometer and Meter. In: *The Nano-Micro Interface: Bridging the Micro and Nano Worlds*. Wiley-VCH, 2004, S. 89–105

[MS89] MUMFORD, D. ; SHAH, J.: Optimal Approximations by Piecewise Smooth Functions and Associated Variational Problems. In: *Communications on Pure and Applied Mathematics* 42 (1989), S. 577–685

[MS05] MIKOLAJCZYK, K. ; SCHMID, C.: A performance evaluation of local descriptors. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence* 27 (2005), Nr. 10, S. 1615–1630

[MSD+09] MACHLEIDT, T. ; SPARRER, E. ; DOROZHOVETS, N. ; MANSKE, E. ; FRANKE, K.-H. ; KAPUSI, D.: Navigation in a Large Measurement Volume by Using AFM

Technology as a Sensor System in the NPMM. In: *Technisches Messen* 5 (2009), S. 274–277

[MT98] MELI, F. ; THALMANN, R.: Long-range AFM profiler used for accurate pitch measurements. In: *Measurement Science and Technology* 9 (1998), S. 1087–1092

[MV98] MAINTZ, J. B. A. ; VIERGEVER, M. A.: A survey of medical image registration. In: *Medical Image Analysis* 2 (1998), Nr. 1, S. 1 – 36. – ISSN 1361–8415

[MW94] MARTIN, Y. ; WICKRAMASINGHE, H. K.: Method for imaging sidewalls by atomic force microscopy. In: *Applied Physics Letters* 64 (1994), Nr. 19, S. 2498–2500

[MYD80] MÜLLER, V. M. ; YUSHENKO, V. S. ; DERJAGUIN, B. V.: On the influence of molecular forces on the deformation of an elastic sphere and its sticking to a rigid plane. In: *J. Colloid Interface Sci.* 77 (1980), S. 91

[MYM+98] MINNE, S. C. ; YARALIOGLU, G. ; MANALIS, S. R. ; ADAMS, J. D. ; ZESCH, J. ; ATALAR, A. ; QUATE, C. F.: Automated parallel high-speed atomic force microscopy. In: *Applied Physics Letters* 72 (1998), Nr. 18, S. 2340–2342

[NB97] NEINHUIS, C. ; BARTHLOTT, W.: Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces. In: *Ann. Bot.*. 79 (1997), Nr. 6, S. 667–677

[OD07] ORJI, N. G. ; DIXSON, R.G.: Higher order tip effects in traceable CD-AFM-based linewidth measurements. In: *Measurement Science and Technology* 18 (2007), Nr. 2, S. 448–455

[Pea01] PEARSON, K.: On lines and planes of closest fit to a system of points in space. In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 6 (1901), S. 559–572

[Pet03] PETERSEN, R.: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Koordinatenmesstechnik in der Nanometrologie*. SHAKER-Verlag, 2003

[PH02] PEI, S.-C. ; HORNG, J.-H.: Design of FIR Bilevel Laplacian-of-Gaussian filter. In: *Signal Process.* 82 (2002), April, S. 677–691

[Phy08] PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & CO. KG (Hrsg.): *P-840 · P-841 Preloaded Piezo Actuators*. Auf der Römerstr. 1 D-76228 Karlsruhe/Palmbach: Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, 2008

[Pic01] PICOTTO, M. G. B.; P. G. B.; Pisanti: A sample scanning system with nanometric accuracy for quantitative SPM measurements. In: *Ultramicroscopy* 86 (2001), S. 247–254

[PLO99] PEGGS, G. N. ; LEWIS, A. J. ; OLDFIELD, S.: Design for a high-accuracy CMM. In: *Annals of CIRP* 48 (1999), S. 417–420

[PP93] PAL, N. R. ; PAL, S. K.: A Review on Image Segmentation Techniques. In: *Pattern Recognition* 26 (1993), S. 1277–1294

[QV07] QIAN, X. ; VILLARRUBIA, J.S.: General three-dimensional image simulation and surface reconstruction in scanning probe microscopy using a dexel representation. In: *Ultramicroscopy* 108 (2007), Nr. 1, S. 29 – 42. – ISSN 0304–3991

[Ran05] RANGELOW, I. W.: Piezoresistive Scanning Proximity Probes for Nanoscience. In: *Technisches Messen* 72 (2005), Nr. 2, S. 103–110

[Rau06] RAUH, W.: Messen von Mikrostrukturen mit Multisensor-Koordinatenmessgeräten. In: *Messtechnik für Mikro- und Nano-Engineering*, VDI Wissensforum IWB GmbH, 2006, S. 173–184

[RC96] REDDY, B. S. ; CHATTERJI, B. N.: An FFT-Based Technique for Translation, Rotation and Scale-Invariant Image Registration. In: *IEEE Transactions on Image Processing* 5 (1996), S. 1266–1270

[RDJ94] ROTHE, H. ; DUPARRÉ, A. ; JACOBS, S.: Generic detrending of surface profiles. In: *Optical Engineering* 33 (1994), S. 3023–3030

[RE03] RUIJL, T. A. M. ; EIJK, J. van: A Novel Ultra Precision CMM based on Fundamental Design Principles. In: *Proceedings of Coodinate measuring machines*, 2003

[RFE01] RUIJL, T. ; FRANSE, J. ; EIJK, J. van: Ultra Precision CMM Aiming for the Ultimate Concept. In: *Precision enginering, nanotechnology: proceedings of the EUSPEN 2nd International Conference*, 2001, S. 234

[RIV+06] RANGELOW, I. W. ; IVANOV, T. ; VOLLAND, B. E. ; DONTSOV, D. ; SAROV, Y. ; IVANOVA, K. ; PERSAUD, A. ; D., Filenko ; NIKOLOV, N. ; SCHMIDT, B. ; ZIER, M. ; GOTSZALK, T. ; SULZBACH, T.: Raster-Sonden-Mikroskopie mit Cantilever-Arrays. In: *Technisches Messen* 73 (2006), S. 485–491

[Roh94] ROHRER, H.: The nanometer age: challenge and chance. In: *Il Nuovo Cimento* 107A (1994), S. 989

[Ros80] ROSENFELD, A.: Some Uses of Pyramids in image Processing and Segmentation. In: *Proceeding of the DARPA Imaging Understanding Workshop*, 1980, S. 112–120

[Ros08] ROSENBERGER, M.: *Navigationssystem für optisch-taktile Präzisionskoordinatenmessgeräte*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2008

[RSSA05] RIEBER, J. M. ; SCHITTER, G. ; STEMMER, A. ; ALLGÖWER, F.: Experimental application of l1-optimal control in atomic force microscopy. In: *Proceedings of the 16th IFAC world congress*, 2005, S. 664–669

[RUCK05] ROTHE, H. ; USBECK, A. ; CIBIS, D. ; KRÜGER, K.: Characterization of drop-on-demand printed conductive silver tracks. In: *Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies II* Bd. 5878 SPIE, 2005, S. 587812

[Rui01] RUIJL, T. A. M.: *Ultra precision coordinate measuring machine*, Technische Universität Delft, Diss., 2001

[Sad98] SADER, J. E.: Frequency response of cantilever beams immersed in viscous fluids with applications to the atomic force microscope. In: *Journal of Applied Physics* 84 (1998), S. 64–76

[Sad99] SADER, J. E.: Calibration of rectangular atomic force microscope cantilevers. In: *Review of Scientific Instruments* 70 (1999), S. 3967–3969

[SAS04] SCHITTER, G. ; ALLGÖWER, A. ; STEMMER, A.: A new control strategy for high-speed atomic force microscopy. In: *Nanotechnology* 15 (2004), S. 108–114

[Sch02] SCHAFER, J.: *Spezifikationen der Dimensional Markup Language*. http://www.dmlspec.org/, 2002

[Seg07] SEGGELEN, J. K.: *NanoCMM-A 3D-Coordinate Measuring Machine with low moving mass for measuring small products in array with nanometer uncertainty*, Technische Universität Eindhoven, Diss., 2007

[SH95] STUDHOLME, C. ; HILTON, A.: Automated 3D registration of truncated MR and CT images of the head. In: *Proceedings of the Sixth British Machine Vision Conference*, 1995, S. 27–36

[SIO06] SIOS MESSTECHNIK GMBH (Hrsg.): *Nanopositioning and Nanomeasuring Machine*. Am Vogelherd 46, 98693 Ilmenau: SIOS Messtechnik GmbH, November 2006

[SKMR98] SINGH, S. ; KHULBE, K. C. ; MATSUURA, T. ; RAMAMURTHY, P.: Membrane characterization by solute transport and atomic force microscopy. In: *Journal of Membrane Science* 142 (1998), S. 111–127

[SMAW94] SCHNEIR, J. ; MCWAID, T. H. ; ALEXANDER, J. ; WILFLEY, B. P.: Design of an atomic force microscope with interferometric position control. In: *J. Vac. Sci. Technol. B* 12 (1994), S. 3561–3566

[SNH+02] SERRY, F. M. ; NAGY, P. J. ; HORWITZ, J. ; ODEN, P. I. ; HEATON, M.G.: 3D MEMS Metrology with Atomic Force Microscope / Veeco Metrology Group, 112 Robin Hill Road, Santa Barbara, CA 93117. 2002. – Forschungsbericht

[SP96] SKOGESTAD, S. ; POSTLETHWAITE, I.: *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. Wiley, 1996

[SRS+04] SEGGELEN, J. K. ; ROSIELLE, P. C. J. N. ; SCHELLEKENS, P. H. J. ; SPAAN, H. A. M. ; BERGMANN, R. H.: Design of a 3D-Coordinate Measuring Machine for measuring small products in array. In: *Proc. 4th Euspen Int. Conf.*, 2004

[SS04] SCHITTER, G. ; STEMMER, A.: Identification and Open-Loop tracking control of a piezoelectric Tube Scanner for High-Speed Scanning-Probe Microscopy. In: *IEEE Transactions of control Systems technology*, 2004, S. 449–454

[SS05] SEBASTIAN, Abu ; SALAPAKA, S. M.: Design Methodologies for Robust Nano-Positioning. In: *IEEE Transaction on Control Systems Technology* 13 (2005), S. 868–876

[SSA03] SCHITTER, G. ; STEMMER, A. ; ALLGOWER, F.: Robust 2DOF-control of a piezoelectric tube scanner for high speed atomic force microscopy. In: *Proceedings Of The 2003 American Control Conference, Vols 1-6* (2003), S. 3720–3725

[SSCS02] SALAPAKA, S. ; SEBASTIAN, A. ; CLEVELAND, J. P. ; SALAPAKA, M. V.: High bandwidth nano-positioner: A robust control approach. In: *Review Of Scientific Instruments* 73 (2002), Nr. 9, S. 3232–3241

[SSS04a] SCHITTER, G. ; STARK, R. W. ; STEMMER, A.: Fast contact-mode atomic force microscopy on biological specimen by model-based control. In: *Ultramicroscopy* 100 (2004), S. 253–257

[SSS04b] STARK, R. W. ; SCHITTER, G. ; STEMMER, A.: Velocity dependent friction laws in contact mode atomic force microscopy. In: *Ultramicroscopy* 100 (2004), S. 309–317

[Sur06] SURFACE IMAGING SYSTEMS RASTERSONDEN- UND SENSORMESSTECHNIK GMBH (Hrsg.): *Ultraobjective SIScan Panel - Benutzerhandbuch*. Kaiserstrasse 100 52134 Herzogenrath: Surface Imaging Systems Rastersonden- und Sensormesstechnik GmbH, Oktober 2006

[TAO+00] TSUJI, M. ; ARAMOTO, T. ; OHYAMA, H.i ; HIBINO, T. ; OMURA, K.: Characterization of CdS thin film in high efficient CdS/CdTe solar cells. In: *Journal of Crystal Growth* 214/215 (2000), S. 1142–1147

[TDSKSD04] TYRELL, J. W. G. ; DAL SAVIO, C. ; KRÜGER-SEHM, R. ; DANZEBRINK, H.-U.: Development of a combined interference microscope objective and scanning probe microscope. In: *Review of Scientific Instruments* 75 (2004), S. 1120–1126

[Tea89] TEAGUE, E C.: The National Institute of Standards and Technology molecular measuring machine project: Metrology and precision engineering design. In: *J. Vac. Sci. Technol. B* 7 (1989), S. 1898–1902

[TL07] TÖPFER, S. C. N. ; LINSS, G.: Quality Measures for Optical Probing in Optical Coordinate Metrology. In: *Measurement Science Review* 7 (2007), S. 51–54

[Töp08] TÖPFER, S. C. N.: *Automatisierte Antastung für die hochauflösende Geometriemessung mit CCD-Bildsensoren*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2008

[TQV08] TIAN, F. ; QIAN, X. ; VILLARRUBIA, J.S.: Blind estimation of general tip shape in AFM imaging. In: *Ultramicroscopy* 109 (2008), Nr. 1, S. 44 – 53

[VC02] VESE, L. A. ; CHAN, T. F.: A Multiphase Level Set Framework for Image Segmentation Using the Mumford and Shah Model. In: *International Journal of Computer Vision* 50 (2002), Nr. 3, S. 271–293

[VDWI97] VORBURGER, T.V. ; DAGATA, J.A. ; WILKENING, G. ; IIZUKA, K.: Industrial Uses of STM and AFM. In: *Annals of CIRP* 46 (1997), Nr. 2, S. 597–620

[Ver99] VERMEULEN, M. M. P. A.: *High-Precision 3D-Coordinate Measuring Machine*, TU Eindhoven, Diss., 1999

[Vil97] VILLARRUBIA, J. S.: Algorithms for Scanned Probe Microscope Image Simulation, Surface Reconstruction, and Tip Estimation. In: *J Res Natl Inst Stand Technol* 102 (1997), S. 102–425

[VJ01] VIOLA, P.A. ; JONES, M.J.: Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In: *CVPR(1)*, 2001, S. 511–518

[VRS98] VERMEULEN, M. M. P. A. ; ROSIELLE, P. C. J. N. ; SCHELLEKENS, P. H. J.: Design of a high-precision 3D-Coordinate measuring machine. In: *Annals of CIRP* 47 (1998), Nr. 1, S. 447–450

[VS91] VINCENT, L. ; SOILLE, P.: Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 13 (1991), jun., Nr. 6, S. 583 –598

[WEPM04] WECKENMANN, A. ; ESTLER, T. ; PEGGS, G. ; MCMURTY, D.: Probing Systems in Dimensional Metrology. In: *Annals of CIRP* 53 (2004), Nr. 2, S. 657–684

[WPH06] WECKENMANN, A. ; PEGGS, G. ; HOFFMANN, J.: Probing systems for dimensional micro- and nano-metrology. In: *Measurement Science and Technology* 17 (2006), S. 504–509

[YJB05] YANG, Q. ; JAGANNATHAN, S. ; BOHANNAN, E. W.: Block Phase Correlation-based Automatic Drift Compensation for Atomic Force Microscopes. In: *Proceedings of 2005 5th IEEE Conference on Nanotechnology Nagoya, Japan, July 2005*, 2005, S. 370–373

[YJB08] YANG, Q. ; JAGANNATHAN, S. ; BOHANNAN, E. W.: Automatic Drift Compensation Using Phase Correlation Method for Nanomanipulation. In: *IEEE Transactions on Nanotechnology* 7 (2008), S. 209–216

[YK08] YACOOT, A. ; KOENDERS, L.: Aspects of scanning force microscope probes and their effects on dimensional measurements. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 41 (2008), S. 103001

[YWS72] YOUNG, R. ; WARD, J. ; SCIRE, F.: An Instrument for Measuring Surface Microtopography. In: *Review Of Scientific Instruments* 43 (1972), S. 999

[ZF03] ZITOVÁ, B. ; FLUSSER, J.: Image registration methods: a survey. In: *Image and Vision Computing* 21 (2003), S. 977–1000

[Zha92] ZHANG, Z.: On local matching of free-form curves. In: *Proceedings of British Machine Vision Conferences*, 1992, S. 347–356

[ZOW06] ZHANG, J ; OU, Z ; WEI, H: Fingerprint Matching Using Phase-Only Correlation and Fourier-Mellin Transforms. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA'06)*, 2006, S. 379–383

[Zyg94] ZYGO CORPORATION (Hrsg.): *NewView 100 Operation Manual OMP-0348C*. Laurel Brook Road, P.O. Box 448, Middlefield, CT 06455-0448: Zygo Corporation, März 1994

[ZYL+07] ZHAN, Z. ; YANG, Y. ; LI, W.J. ; DONG, Z. ; QU, Y. ; WANG, Y. ; ZHOU, L.: AFM operating-drift detection and analyses based on automated sequential image processing. In: *Nanotechnology, 2007. IEEE-NANO 2007. 7th IEEE Conference on*, 2007, S. 748 –753

Lebenslauf

PERSÖNLICHE ANGABEN

Name:	Christian Recknagel
Geburtsdatum:	12.09.1980
Geburtsort:	Erfurt
Familienstand:	ledig

SCHULISCHE AUSBILDUNG

1987 – 1991	Polytechnische Oberschule Pablo Neruda in Erfurt
1991 – 1995	Heinrich-Mann-Gymnasium in Erfurt
1995 – 1999	Prof.-Carl-Fiedler-Gymnasium in Suhl

GRUNDWEHRDIENST

1999 – 2000	Grundwehrdienst, Tätigkeit als Raketenelektromechaniker

STUDIUM

2000 – 2006	Studium der Mechatronik an der Technischen Universität Ilmenau

BERUFLICHER WERDEGANG

2007 – 2010	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mess- und Informationstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg